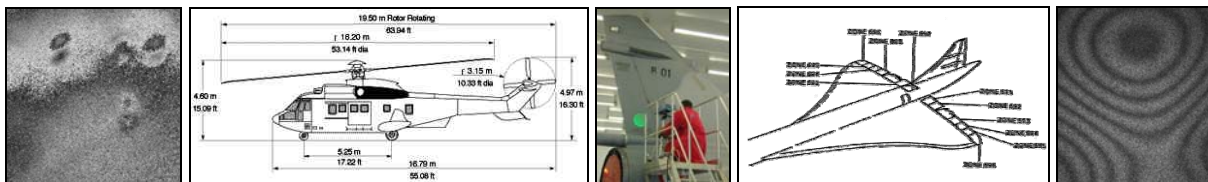


FERNANDO MANUEL FERREIRA DOS SANTOS

NOVOS MÉTODOS DE INTERFEROMETRIA DE *SPECKLE* COM LASERS DE IMPULSO:

APLICAÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE ESTRUTURAS



FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Porto 2003

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Mecânica e gestão Industrial

NOVOS MÉTODOS DE INTERFEROMETRIA DE *SPECKLE* COM LASERS DE IMPULSO:

APLICAÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE ESTRUTURAS

Fernando Manuel Ferreira dos Santos

Licenciado em Física pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do
grau de Doutor em Engenharia Mecânica

Dissertação realizada sob a supervisão do Professor Doutor Mário Augusto Pires Vaz

Departamento de Engenharia Mecânica

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Junho 2003

Resumo

Esta dissertação descreve o desenvolvimento de novos métodos de Interferometria de *Speckle* com lasers de impulso e a sua aplicação ao estudo do comportamento dinâmico de estruturas. Foram desenvolvidas técnicas com aplicação directa em Engenharia Mecânica, principalmente para o estudo de fenómenos transitórios rápidos, como é, por exemplo, o caso da propagação de ondas de tensão devidas a cargas de impacto.

A utilização de técnicas pulsadas para estudar fenómenos dinâmicos exige uma grande precisão em termos de sincronismo pelo que foi também objectivo deste trabalho a definição das características da electrónica auxiliar necessária. Pretendeu-se que após a realização do programa de trabalhos fosse possível efectuar registos de dupla-exposição em vídeo com lasers de duplo impulso, quer se utilize um laser de Nd:YAG, quer um laser de Rubi. Paralelamente a este trabalho desenvolveram-se rotinas de aquisição e processamento de imagem compatíveis com o registo através de iluminação com lasers de impulsos. Diferentes técnicas de cálculo de fase com registos de dupla exposição foram aplicadas na medição quantitativa de deslocamentos com técnicas de Interferometria de *Speckle*.

Entre as técnicas desenvolvidas encontram-se métodos de medição de campo de deslocamentos (Holografia-TV) e métodos de medição de campos de gradientes de deslocamento (*Shearography*). O primeiro método foi aplicado ao estudo da propagação de ondas de tensão criadas através do impacto de um êmbolo numa placa metálica. A análise vibratória de componentes áudio e de um componente de motor de avião foram também realizadas. Foram determinadas as formas modais e amplitudes de vibração de um altifalante Audax e de uma pá de turbina de avião. Este estudo serviu também para validar o código de elementos finito ALGOR utilizado na modelização das formas modais da pá de turbina. Por fim são apresentados os resultados da aplicação destas configurações interferométricas a um problema da indústria automóvel: a análise vibratória do cárter do motor e da panela de escape.

A aplicação do método de *Shearography* a problemas de Controlo Não-Destrutivo foi também um dos objectivos deste trabalho. Vários desenvolvimentos são apresentados no que diz respeito às montagens ópticas (baseadas em interferómetros de Michelson ou de Mach-Zehnder). Por fim demonstra-se a aplicação desta técnica em situações reais do sector aeronáutico: Mirage2000, ATR, Concorde, ...

Abstract

This dissertation describes the development of new speckle interferometric methods to be used with pulsed lasers and its application to the study of structural dynamic behaviour. The developed techniques have straight forward applications in Experimental Mechanics. This is the case of transient phenomena studies, e.g. stress wave propagation due to impact loads.

The use of pulsed techniques for the study of dynamic phenomena highlighted several constraints in the way synchronising was done. Thus, another goal of the work was the definition of the auxiliary electronics for a correct time synchronisation. At the end of the work one should be able to record double-exposure video images with pulsed lasers, Nd:YAG or Ruby ones. At the same time image grabbing and image processing algorithms were developed. Several phase calculation techniques were applied to the double-exposure recordings for the quantitative measurement of the displacement field by Speckle Interferometry.

Among the developed techniques one find displacement field (TV-Holography) and gradient of displacement field (shearography) measurements. The first one was used on the stress wave propagation study caused by the impact of a piston on a metallic plate. The modal analysis of an audio speaker and an aircraft engine blade were also performed. Here modal shapes and vibration amplitudes were determined and compared with the ones coming from a FEM analysis with the ALGOR code. Finally, some results are presented of TV-Holography configuration applied in the automotive industry for the modal analysis of the gearbox housing and exhaust system of an automobile.

The shearography method was applied to non-destructive testing of aeronautics components. Several developments are presented (based on Michelson and Mach-Zehnder interferometers). The results shown were obtained on real inspection environment situations on: Mirage2000, ATR, Concorde, ...

Résumé

Cette dissertation décrit le développement de nouvelles méthodes de Interférométrie de *Speckle* avec des lasers pulsées et leur application à l'étude du comportement dynamique des structures. Des techniques avec des applications directes en Mécanique Expérimentale ont été développées, comme c'est le cas de l'étude de la propagation d'ondes de tension due à excitation par choc.

L'utilisation de techniques pulsées pour étudier des phénomènes dynamiques soulève des problèmes de synchronisation qui ont aussi été objet d'étude. A la fin du projet on doit être capable d'enregistrer sous format vidéo des double-impulsions générées par des lasers Nd:YAG ou de Rubis. Parallèlement à ce travail des algorithmes de acquisition et traitement d'images, compatibles avec les registres par impulsions laser, ont été développés. Différentes techniques de calcul de phase avec des registres en double-exposition ont été utilisées pour la mesure quantitative des champs de déplacements par Interférométrie de *Speckle*.

Entre les techniques développées il y a des méthodes de mesure de champs de déplacement (Holographie-TV) et techniques de mesure du gradient des champs de déplacement (*Shearography*). La première a été utilisée dans l'étude de la propagation d'une onde de tension créée par le choc d'un piston contre une plaque métallique. L'analyse vibratoire d'un haut-parleur et d'une pale de turbine d'avion ont aussi été réalisées. L'étude a permis de déterminer les formes modales et les amplitudes de vibration des éléments en essai et aussi valider le code d'Eléments Finis, ALGOR, utilisés dans la modélisation des formes modales de la pale de turbine. Des résultats de l'application de cette technique à l'analyse vibratoire des composants de moteur de voiture (carter et pot d'échappement) sont aussi présentés.

L'application de la *Shearography* à des problèmes de Contrôle Non-Destructif a, aussi, été un des objectifs de ce travail. Différents développements sont présentés, basés sur les interféromètres de Michelson et Mach-Zehnder. L'utilisation de cette technique en situation d'inspection réelle dans le secteur aéronautique Mirage2000, ATR, Concorde, ...conclut ce travail.

Agradecimentos

Muitas pessoas contribuíram para esta tese e este é o momento de lhes agradecer. Esta tese, transversal em termos de ciências que abarcou (óptica, materiais, electrónica, elementos finitos, CND, ...), necessitou de uma estreita colaboração entre o autor, os colegas do Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental e os colegas das diferentes entidades que tiveram uma acção importante no bom desenrolar deste trabalho (Air France, Airbus, Holo3, INESC-N e NDT Expert).

Correndo o risco de deixar alguém de lado gostaria de individualizar o apoio recebido. Assim, começo por agradecer ao INEGI e ao Prof. Silva Gomes, a possibilidade que me deram de realizar esta tese enquanto membro do Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental. Ao Prof. Mário Vaz, meu orientador, quero agradecer a confiança que me depositou, a disponibilidade demonstrada durante estes anos de trabalho, as frutuosas trocas de opiniões, o encorajamento, os bons conselhos,... . Ao meu amigo e colega Jaime Monteiro agradeço-lhe os bons momentos passados no LOME e os bons conselhos na realização das montagens ópticas. A sua total disponibilidade nunca será demais assinalada. Ao Hernâni e ao Jorge quero agradecer a realização dos seus trabalhos de fim de curso, dedicados ao sincronismo electrónico do sistema de aquisição de imagem. Ao Joaquim Carneiro agradeço a disponibilidade demonstrada na modelização por elementos finitos de um componente de motor de avião. Foi um grande privilégio trabalhar no LOME com esta equipa.

Aos meus amigos Vítor Costa (*coisa fina*), Pedro Almeida (*Atila*), Maxanda Nunes (*Inquilina*) e Xana Silva (*Bjork*) quero agradecer-lhes o constante encorajamento durante estes últimos anos, bem como as *castenhas*, o *Mercedes*... Graças a eles as viagens ao Porto são frequentes e frutuosas. Mosh!

Finalmente, gostaria de aproveitar esta oportunidade para agradecer à minha família o apoio que senti durante estes anos de trabalho. Um apoio que é extensível às decisões pessoais tomadas, que ditaram que esta tese fosse começada no Porto e terminada em Toulouse.

Last but not least quero agradecer à Christine todo o apoio, incentivo e paciência, demonstrados durante estes anos de tese.

Aos meus pais

Índice

Lista de abreviaturas

Lista de símbolos

Capítulo 1 – Óptica e Mecânica Experimental

1.1 – Introdução (Enquadramento, motivações e objectivos).....	1.2
1.2 – Desenvolvimento do trabalho.....	1.5
1.3 – Da Interferometria à Interferometria de <i>Speckle</i>	1.8
1.4 – Aplicações da Interferometria de <i>Speckle</i> à Mecânica Experimental.....	1.16
1.5 – Processamento de imagem.....	1.26
1.6 – Conclusão.....	1.28
Referências.....	1.29

Capítulo 2 – Lasers e Interferometria de *Speckle*

2.1 - <i>Lasers</i>	2.2
2.2 – Fundamentos da Interferometria de <i>Speckle</i>	2.27
Referências.....	2.45

Capítulo 3 - Componentes dos sistemas interferometricos

3.1 – Sistemas de iluminação laser.....	3.2
3.2 – Detectores CCD.....	3.28
3.3 – Sistema de sincronização temporal, SST.....	3.43
Referências.....	3.47

Capítulo 4 - Calculo de fase e processamento de imagem

4.1 – Introdução.....	4.2
4.2 – Correlação dos padrões de <i>speckle</i>	4.4
4.3 – Cálculo de fase.....	4.11
4.4 – Processamento de imagem.....	4.30
Referencias.....	4.38

Capítulo 5 – Sistemas dinâmicos de Interferometria de *Speckle*

5.1 – Portadora espacial em Interferometria de <i>Speckle</i>	5.2
5.2 – Sistemas de Holografia-TV pulsada.....	5.9
5.3 – Sistemas de Shearography pulsada.....	5.21
Referências.....	5.24

Capítulo 6 - Aplicações à dinâmica

6.1 – Introdução.....	6.2
6.2 – Vibrações harmónicas.....	6.4
6.3 – Medições com excitação por choque.....	6.39
Referências.....	6.52

Capítulo 7 Aplicações ao Controlo Não-Destrutivo

7.1 – Introdução.....	7.2
7.2 – Sistemas de <i>Shearography</i> desenvolvidos.....	7.6
7.3 – Métodos de solitação.....	7.13
7.4 – Aplicações aeronáuticas.....	7.20
Referências.....	7.41

Capítulo 8 - Conclusões

8.1 – Conclusões.....	8.2
8.2 – Desenvolvimentos futuros.....	8.5

Anexo A - Levantamento de forma 3D de uma pá de turbina e análise modal por elementos finitos

Lista de abreviaturas

A/D –	Analógico/Digital
AET –	Análise Experimental de Tensões
ALU –	Arithmetic Logic Unit
BUT –	Build-Up Time
CANDIA –	Cost reduction by Advanced Non Destructive Inspection of Aeronautical structures
CAD/CAM –	Computed Assisted Design / Computed Assisted Manufacturing
CCD –	Charged Coupled Device
CCIR –	Comité Consultatif de la Radiodiffusion
CERN –	Centre Européen de Recherche Nucléaire
CFRP –	Carbon Fibre Reinforced Polymer
COFREND –	COnfederation FRançaise d’Essais Non Destructifs
C-MOS –	Condensador Metal Oxido Silício
CND –	Controlo Não-Destrutivo
CPU –	Central Processing Unit
CW –	Continuos wave
D/A –	Digital/Analógico
ddp –	Diferença de potencial
DERA –	Defence Evaluation and Research Agency
DSP –	Digital Signal Processor
EADS –	European Aeronautical Defence and Space company
EOC –	End Of Charge
EProM –	Erasable Programmable Memory
ESPI –	Electronic Speckle Pattern Interferometry
EUCLID –	EUropean Co-operation for the Long term In Defense
FAA –	Federal Aviation Authorities
FAP –	Força Aérea Portuguesa
FFT –	Fast Fourier Transform
FCUP –	Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
FEUP –	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GFRP –	Glass Fibre Reinforced Polymer
GLARE –	GLAss fibre REinforced aluminium
INEGI –	Instituto de Engenharia e Gestão Industrial
INESC-N –	Instituto Nacional de Engenharia de Sistemas e Computadores - Norte
I&D –	Investigação e Desenvolvimento

IH –	Interferometria Holográfica
INCA –	Improved NDE Concepts for Innovative Aircraft Structures and Efficient Operational Maintenance
ISA –	Industry Standard Architecture
KDP –	Potassium Dihydrogen Phosphate
LASER –	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LCR –	Light Control System
LHC –	Large Hadron Collider
LTI –	Laser Technology, Inc.
LOME –	Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental
LUIS –	Laser Ultrasound Inspection System
LUT –	Look-Up table
MASER –	Micro-wave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MISER –	Monolithic Isolated Single-mode End-pumped Ring
MOS-FET –	Metal Oxide Silicium – Field Effect Transistor
NIDA –	Ninho de Abelha, Honeycomb structure
NTM –	Non destructive Testing Manual
NTSC –	National Television System Committee
OGMA–	Oficinas Gerais de Material Aeronautico
PDHS–	Pulsed Digital Holography and Shearography
PBS –	Polarising Beam-Splitter
PC –	Personal Computer
PCI –	Peripheral Component Interconnect
PZT –	Piezo-electric transducer
QSBUTR –	Q-Switch Build-Up Time Reduction
RAM –	Random Access Memory
RGB –	Red Green Blue
SB –	Service Bulletin
SDI –	Strategic Defense Initiative
SST –	Sistema de Sincronização Temporal
TEM –	Transverse Electro-Magnetic
TTL –	Transistir-Transistor Logic
VIP –	Vibration Intensity Processing by full-field Laser multipulse technique
YAG –	Yttrium Aluminium Garnet
YVO ₄ –	Yttrium Orthovanadate

Lista de símbolos

a –	raio do núcleo de uma fibra óptica, factor de escala
A –	área
B –	campo magnético, brilho
c –	velocidade de propagação da onda electromagnética, coeficiente de correlação
C –	contraste
d –	tamanho do <i>speckle</i> , distância
D –	diâmetro
E –	campo eléctrico, energia, módulo de elasticidade
f –	frequência da perturbação, distância focal
h –	constante de Planck, função hermito-gaussiana, espessura
H –	polinómio de Hermite
i –	interfranja, $\sqrt{(-1)}$
I –	intensidade
J –	função de Bessel, função de auto-correlação
k –	vector de onda, número de onda, vector sensibilidade
K –	constante de Boltzmann
L –	comprimento da cavidade ressonante
l_c –	comprimento de coerência
M –	função modulação
n –	número de fotões, índice de refração
N –	número de átomos, de modos guiados, de imagens, ...
NA –	abertura numérica
p –	passo da portadora
P –	polarização, tamanho do pixel, pressão, função pupila do sistema óptico
ρ –	densidade de probabilidade
q –	parâmetro complexo
r –	vector posição
R –	função de auto-correlação
t –	tempo
T –	temperatura
U –	frente de onda
V –	frequência normalizada
x –	posição axial

y	–	posição axial
z	–	distância, deslocamento
Z	–	amplitude de vibração
α	–	incremento de fase
β	–	constante de propagação numa fibra óptica, rotação do espelho
γ	–	rotação da superfície, ângulo entre iluminações
Δ	–	variação
Δx	–	<i>shear</i> entre imagens
ε	–	translação do espelho
ε_0	–	permitividade eléctrica do vazio
ν	–	frequência da perturbação, coeficiente de Poisson
λ	–	comprimento de onda
θ	–	ângulo
ω	–	colo do feixe laser, frequência angular
χ	–	susceptibilidade eléctrica
Φ	–	fase
μ_0	–	permeabilidade magnética do vazio
φ	–	fase
σ	–	desvio padrão
σ^2	–	variância da intensidade
$\langle \rangle$	–	valor médio
∇^2	–	Operador laplaciano

CAPÍTULO 1

ÓPTICA E MECÂNICA EXPERIMENTAL

1.1 – Introdução. Enquadramento, motivações e objectivos.....	1.2
1.2 – Desenvolvimento do trabalho.....	1.5
1.3 – Da Interferometria à Interferometria de <i>Speckle</i>	1.8
1.4 – Aplicações da Interferometria de <i>Speckle</i> à Mecânica Experimental.....	1.16
1.5 – Processamento de imagem.....	1.26
1.6 – Conclusões.....	1.28
Referências.....	1.29

No **capítulo 1** descrevem-se, sucintamente, aqueles que são os aspectos inovadores desta tese no que se refere ao desenvolvimento de novos sistemas de Interferometria de Speckle e da sua aplicação à Mecânica Experimental. É realizado um enquadramento do tema da tese em relação ao estado actual do desenvolvimento científico na área da metrologia óptica e apresentadas as perspectivas de desenvolvimento futuro. Este capítulo contém uma revisão geral sobre os desenvolvimentos da Óptica no que se refere a conceitos e sistemas desenvolvidos no fim do passado século. Os desenvolvimentos recentes da Mecânica Experimental são aqui descritos e a complementaridade de interesses entre as duas disciplinas é aqui invocada de forma a permitir resolver problemas de solução alternativa difícil ou mesmo inexistente. Este ponto serve ainda de base à apresentação das aplicações industriais das técnicas de Interferometria de Speckle na área da Mecânica Experimental.

1.1 – INTRODUÇÃO

Enquadramento

A Ciência dos Materiais experimentou um enorme desenvolvimento nas últimas décadas. Novos materiais foram desenvolvidos e novas aplicações apareceram para materiais já conhecidos. Contudo, foi o desenvolvimento dos materiais compósitos que mais contribuiu para a revolução verificada. A capacidade de produzir materiais com características adequadas a cada aplicação permite a construção otimizada de componentes estruturais.

Com a divulgação das aplicações destes materiais tornou-se necessário desenvolver técnicas, quer experimentais, quer numéricas, que permitissem caracterizar o seu comportamento com grande rigor. Os métodos experimentais assumem aqui particular relevância permitindo efectuar medições directamente sobre protótipos e daí ajustar os modelos matemáticos. De entre as várias técnicas experimentais destacaram-se as técnicas de Interferometria Holográfica como sendo aquelas que apresentavam um maior potencial de desenvolvimento e um mais vasto campo de aplicação. Estas técnicas, sendo globais, permitem analisar de uma só vez a informação respeitante a uma área, não necessitando de contacto, podem ser aplicadas sem alterar as características dos componentes em estudo. Ao utilizarem o comprimento de onda da luz como unidade de medida apresentam uma resolução de apenas algumas dezenas de nanómetros. Embora a quantidade de informação disponível nos interferogramas seja enorme, a utilização de sistemas automáticos de análise de resultados, baseados em sistemas de processamento de imagem e técnicas de modulação de fase, permitem analisá-la de forma expedita. Deste modo, é possível obter os resultados das medidas sob a

forma de ficheiros numéricos que poderão ser utilizados, por exemplo, em programas de cálculo de tensões baseados no método dos Elementos Finitos.

A elevada resolução e sensibilidade destas técnicas impõe, no entanto, severas restrições no que toca à estabilidade das montagens ópticas. A introdução da gravação electrónica permitiu reduzir o tempo de registo, diminuindo a sensibilidade das montagens ópticas às perturbações externas. Contudo, estes métodos de gravação não são suficientemente rápidos quando se pretendem efectuar medições em ambientes ruidosos. Neste domínio, foi a introdução de fontes de luz coerente pulsadas (de que são exemplo os lasers de Rubi e de Nd:YAG) que permitiu tornar estas técnicas praticamente imunes à influência das condições ambientais. Dispondo de grandes quantidades de energia em intervalos de tempo muito curtos, tipicamente algumas dezenas de nanosegundos, é possível registar, num curto intervalo de tempo, padrões de intensidade provenientes de dois estados distintos de uma superfície. Estes registos, depois de correlacionados, permitem obter padrões de franjas contendo informação sobre o comportamento dos componentes.

O aparecimento das técnicas pulsadas permitiu também alargar o domínio de aplicação das técnicas de Interferometria Holográfica. Desta forma, fenómenos transitórios rápidos podem ser estudados a partir de registos efectuados entre instantes separados por intervalos de tempo conhecidos. No caso de fenómenos não destrutivos que possam ser repetidos, a sua evolução pode ser estudada a partir de várias amostras recolhidas com diferentes intervalos de tempo.

De tudo isto resulta óbvio o elevado interesse que estas técnicas apresentam na sua aplicação a problemas de Engenharia, principalmente no estudo de aplicações em que não existam ainda soluções numéricas fiáveis. Tal é o caso do estudo do comportamento de componentes construídos em alguns materiais compósitos. Dado tratar-se de técnicas não destrutivas operando sem contacto são também adequadas para análise de diagnóstico em componentes defeituosos.

Por último, é de referir ainda a possibilidade de, após reduzir significativamente a sensibilidade a perturbações, se poderem construir sistemas compactos e portáteis. Estes sistemas poderão integrar a nova geração de lasers pulsados bombeados por díodos laser que, apresentando reduzidas dimensões, permitem elevadas energias por impulso.

Motivações

A actividade de investigação do autor iniciou-se no INEGI, em 1993, após a conclusão da Licenciatura em Física (opção: Ópto-electrónica) pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP). Esta actividade começou com o desenvolvimento de sensores de fibra óptica e sua integração em materiais compósitos, actividade que foi orientada pela Dr^a Teresa Restivo. No âmbito deste trabalho, um estágio de 4 meses na Universidade de Strathclyde em Glasgow, na Escócia, revelou-se particularmente frutuoso.

A integração do autor no Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) do INEGI permitiu-lhe contactar com as técnicas de Interferometria Holográfica (e de *Speckle*) e obter o grau de Mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), em finais de 1996. O tema de dissertação foi a “*Utilização das técnicas de interferometria laser para o controlo não-destrutivo de*

estruturas em material compósito”. O autor, integrado na equipa do LOME, teve oportunidade de participar em vários projectos de investigação na área da Interferometria de *Speckle*. Estes projectos permitiram criar uma rede de contactos à escala europeia capaz de promover uma verdadeira troca de conhecimentos entre os diferentes grupos participantes, quer industriais (Airbus, Peugeot, Bosch, Ettemeyer,...) quer de investigação (HOLO3, Univ. Strathclyde, CETIM,...). Foi, por isso, com alguma naturalidade que o autor iniciou o trabalho de doutoramento na área das técnicas de Interferometria de *Speckle*. Esta tese permitiu aprofundar os conhecimentos em Óptica e associá-los a aplicações concretas em problemas de Mecânica Experimental. As perspectivas abertas com este estudo sobre as técnicas de Interferometria de *Speckle* e as suas aplicações na indústria aeronáutica e automóvel tornaram este trabalho particularmente atractivo.

O LOME, fundado em 1992 com fundos do Projecto CIÊNCIA, é um laboratório de investigação aplicada dedicado à Análise Experimental de Tensões (AET). Embora inicialmente vocacionado para trabalhos com as técnicas clássicas de AET como: Extensometria, Fotoelasticidade e Moiré, veio a apetrechar-se com o equipamento óptico que lhe permite hoje dedicar-se à realização de trabalhos em Interferometria Holográfica e de *Speckle*. Para o sucesso desta última etapa foi muito importante a colaboração estabelecida com o grupo de Óptica Quântica da FCUP.

Os equipamentos postos à disposição do autor pelo LOME e utilizados na realização desta tese, incluíam diferentes tipos de fontes de luz coerente – contínua e pulsada -, diferentes tipos de câmaras CCD (*Charged Coupled Device*) – alta e baixa resolução - e diferentes tipos de placas de aquisição de imagem – com ou sem DSP. Entre as fontes de luz coerente deve destacar-se o laser pulsado de Nd:YAG que serviu de base a grande parte dos desenvolvimentos realizados. Estes meios foram ultimamente reforçados com a aquisição de um laser contínuo de Nd:YVO₄ (COHERENT) e com a aquisição de um laser pulsado de Rubi (INOLAS), capaz de ser integrado em sistemas de medições dinâmicas. Este reforço de meios vem comprovar o interesse crescente pelas técnicas desenvolvidas no âmbito desta tese. Durante a realização do trabalho uma nova câmara CCD de registo assíncrono de imagem foi também adquirida.

Objectivos

O objectivo principal deste trabalho consistiu no desenvolvimento de técnicas de Interferometria de *Speckle* baseadas na utilização de lasers pulsados. Foram desenvolvidas técnicas com aplicação directa em Engenharia Mecânica, principalmente para o estudo de fenómenos transitórios rápidos, como é, por exemplo, o caso da propagação de ondas de tensão devidas a cargas de impacto.

O levantamento exaustivo das publicações científicas mais relevantes sobre estas técnicas permitiu ao autor conhecer o estado da arte neste domínio. A informação recolhida permitiu também seleccionar convenientemente as técnicas que melhor se ajustavam ao laser de impulsos de Nd:YAG que na altura se encontrava disponível no LOME.

A utilização de técnicas pulsadas para estudar fenómenos rápidos coloca alguns problemas de sincronismo pelo que foi também realizada neste trabalho a definição das características da electrónica auxiliar necessária. Na prática, pretendeu-se que após a realização do programa de trabalhos fosse possível efectuar

registos interferométricos em vídeo com lasers de duplo impulso, quer se utilize um laser de Nd:YAG, quer um laser de Rubi.

A enorme quantidade de informação que fica disponível em cada registo interferométrico exige uma análise automática dos padrões de interferência pelo que foram desenvolvidas rotinas de *software* especialmente dedicadas a este fim. Técnicas de cálculo de fase com registos de dupla exposição foram aplicadas na medição quantitativa de deslocamentos com técnicas holográficas. A aplicação destas técnicas a problemas de solução conhecida serviu para revelar as suas potencialidades e aferir da qualidade das medições que estas permitem. Alguns dos problemas estudados foram, por isso, alvo de medições com outras técnicas ou calculados por via numérica de forma a dispor de várias soluções que permitam a comparação de resultados. Este trabalho incluiu o projecto e construção de um sistema compacto e portátil para inspecção não destrutiva de materiais compósitos. O sistema construído utiliza a técnica designada por *Shearography* para detectar os gradientes de deslocamentos devidos a defeitos no interior de componentes construídos em materiais compósitos. Esta técnica é hoje de utilização corrente em aplicações industriais para inspecção não destrutiva de componentes em materiais compósitos.

1.2 – DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A elaboração desta tese seguiu de perto a seguinte metodologia:

- Levantamento bibliográfico exaustivo sobre os tópicos relacionados com o tema do trabalho, em particular sobre as técnicas de medição e controlo sem contacto de superfícies tridimensionais e técnicas de análise de fenómenos transitórios;
- Estudo sistemático e avaliação das características do laser de impulsos disponível no LOME, tais como: comprimento de coerência, características do feixe e da frente de onda e electrónica de controlo;
- Aperfeiçoamento das técnicas seleccionadas usando lasers de emissão contínua e tendo em vista a sua adaptação a laseres de emissão pulsada;
- Definição das características dos sistemas electrónicos auxiliares com vista à construção de um sistema automático de gravação de interferogramas em duplo impulso. Teste deste sistema em ensaios específicos tais como; registo de interferogramas em dupla exposição usando detectores de vídeo baseados em tecnologia de CCD;
- Desenvolvimento de um conjunto de rotinas de processamento de imagem que possam ser utilizadas com um laser de emissão pulsada. Os programas a desenvolver deveriam permitir efectuar cálculos de fase a partir de registos de dupla exposição. Nesta tarefa estão também incluídos os trabalhos

necessários para adaptar os registos interferométricos de forma a permitirem o cálculo de fase, como por exemplo, as adaptações necessárias para introduzir uma portadora espacial;

- Aplicação das técnicas desenvolvidas ao estudo de problemas de Engenharia Mecânica, principalmente no estudo de problemas transitórios, tais como a propagação de ondas de tensão em estruturas e fenómenos de impacto e em problemas de análise vibratória.

Durante a realização desta tese o autor teve a oportunidade de estagiar durante 3 meses no laboratório francês HOLO3, local de grande reputação em tudo o que se refere à metrologia óptica. Durante esta fase foi possível realizar testes sobre componentes de um automóvel. A conclusão da tese fez-se já durante a fase em que o autor foi exercer o cargo de engenheiro responsável pelo sector I&D da sociedade francesa NDT Expert. Esta companhia, uma *joint-venture* da *Airbus France* e do *Bureau Veritas*, tem como principal função o desenvolvimento e realização de ensaios não-destrutivos em estruturas aeronáuticas e espaciais. Aí, foi possível utilizar diversos sistemas comerciais de *shearography* em ensaios *in-situ* e observar os problemas reais de que se reveste a implementação de novos meios técnicos de controlo não-destrutivo (baseados na Interferometria Holográfica) na indústria aeronáutica.

Estrutura da tese

Esta dissertação está dividida em 8 capítulos intitulados da seguinte forma:

- 1 – Óptica e Mecânica Experimental
- 2 – *Lasers* e Interferometria de *Speckle*
- 3 – Componentes dos Sistemas Interferométricos
- 4 – Cálculo de fase e processamento de imagem
- 5 – Sistemas dinâmicos de Interferometria de *Speckle*
- 6 – Aplicações dinâmicas
- 7 – Controlo Não-Destrutivo
- 8 – Conclusões

O **capítulo 1** descreve, sucintamente, aqueles que são os aspectos inovadores desta tese no que se refere ao desenvolvimento de novos sistemas de Interferometria de *Speckle* e da sua aplicação à medição de deformações rápidas. É realizado um enquadramento do tema da tese em relação ao estado actual do desenvolvimento científico na área da metrologia óptica e às suas perspectivas de desenvolvimento futuras. Este capítulo contém uma revisão geral sobre os desenvolvimentos da Óptica no que se refere a conceitos e sistemas desenvolvidos neste século. Os desenvolvimentos recentes da Mecânica Experimental são aqui descritos e a complementaridade de interesses entre as duas disciplinas é aqui invocado de forma a serem resolvidos problemas de solução alternativa difícil ou mesmo inexistente.

No **capítulo 2** é referido o desenvolvimento das técnicas de interferometria de *speckle* e a sua relação com o aparecimento dos lasers e dos suportes electrónicos de gravação de interferogramas. Aqui, é feita a descrição

do desenvolvimento das técnicas de Interferometria, começando pela Holografia, passando pela Interferometria Holográfica e terminando nas técnicas de Interferometria de *Speckle*. As características das fontes de luz utilizadas, os lasers, são também descritas neste capítulo. São apresentados os seus princípios básicos de funcionamento e a sua tecnologia. Alguns fenómenos ópticos não-lineares e dinâmicos são aqui descritos por permitirem uma melhor compreensão de certas características da emissão laser que serão utilizadas no decurso dos trabalhos experimentais. Por último, neste capítulo são descritas as técnicas de registo de interferogramas, destacando as técnicas de registo electrónico através, nomeadamente, dos dispositivos CCD.

O **capítulo 3** é dedicado ao estudo dos componentes dos sistemas interferométricos utilizados no âmbito desta tese. As fontes de luz utilizadas, lasers de Árgon, Rubi e Nd:YAG, são aqui analisadas em pormenor. A parte inicial do capítulo contém, ainda, um estudo sobre a forma de alterar o perfil gaussiano da emissão laser de forma a torná-la mais homogénea. Seguidamente é feita uma descrição de alguns componentes ópticos essenciais. Este capítulo inclui ainda um estudo sobre a implementação de fibras ópticas nos sistemas de Interferometria de *Speckle*. Por fim são caracterizadas as câmaras CCD utilizadas em cada um dos sistemas interferométricos, MICAM, SONY e KODAK e descrito o desenvolvimento do sistema electrónico de controlo de tempos para a sincronização laser pulsado/aquisição vídeo.

As técnicas de cálculo de fase e de processamento de imagem são tratadas no **capítulo 4**. Aqui é explicada a implementação de um sistema de tratamento de imagem através do seu *hardware* e das rotinas de processamento de imagem. São descritas rotinas desenvolvidas e/ou utilizadas nesta tese, nomeadamente a correlação de padrões de *speckle* por subtração em tempo-real e por dupla-exposição, o cálculo de fase por modulação de fase temporal ou por FFT e as rotinas de pós-processamento como a filtragem e a desmodulação.

O **capítulo 5** é dedicado ao estudo dos sistemas ópticos de Interferometria de *Speckle*. Os sistemas clássicos de ESPI (no plano e fora do plano) e de *Shear* (Hung e Michelson) são descritos detalhadamente. Apresentam-se de seguida os desenvolvimentos de novos sistemas interferométricos aptos a serem utilizados com lasers de impulsos. Para a medição de deslocamentos fora-do-plano, utilizando o ESPI, são apresentadas duas novas configurações ópticas, uma baseada numa frequência portadora primária e outra numa frequência portadora secundária. O desenvolvimento de um novo sistema de *Shearography*, baseado no interferómetro de Mach-Zehnder é apresentado na parte final deste capítulo.

No **capítulo 6** são apresentados os resultados práticos da aplicação dos sistemas ópticos desenvolvidos nesta tese a problemas de Mecânica Experimental. Aqui são apresentados resultados referentes ao estudo de fenómenos dinâmicos através da determinação dos seus campos de deslocamento. A propagação de ondas de

flexão é estudada através do impacto de um êmbolo numa placa metálica. A análise vibratória de componentes audio e de um componente de um motor foram também realizadas. Nesta análise foram determinadas as formas modais e amplitudes de vibração de um altifalante Audax e de uma pá de turbina de avião. Este estudo serviu também para validar o código de elementos finitos ALGOR utilizado na modelização das formas modais da pá de turbina (a descrição da técnica de levantamento de forma utilizado na geração do modelo da pá por elementos finitos é apresentada em anexo). Por fim são apresentados os resultados da aplicação destas configurações interferométricas a um problema da indústria automóvel: a análise vibratória do carter do motor e da panela de escape. Estes ensaios foram realizados nas instalações do grupo PSA em Belchamp, França, antes do modelo de um novo automóvel ter entrado em comercialização.

O Controlo Não Destrutivo baseado nas técnicas de interferometria laser pode ser considerado como um sector distinto das aplicações anteriores. Este aspecto pode ser observado através das características próprias da medição/detecção efectuada e pela sua avançada utilização na indústria, sobretudo aeronáutica. O **capítulo 7** apresenta os resultados práticos da aplicação dos sistemas ópticos de *Shearography* desenvolvidos nesta tese. De forma complementar são apresentados resultados obtidos com dois sistemas comerciais. Desta forma uma visão global sobre as capacidades de cada um dos sistemas e da sua aplicabilidade *in-situ* (sobre aeronaves reais MIRAGE 2000 e Concorde) é discutida. Apesar de diferentes aspectos da *shearography* serem abordados neste capítulo ênfase especial é dada à questão da estimulação adequada da estrutura em teste.

O **capítulo 8** encerra esta tese com a apresentação das conclusões. Os resultados mais importantes são sumariamente expostos juntamente com uma interpretação pessoal. Finalmente, os caminhos futuros para novos desenvolvimentos na área das técnicas de interferometria de *speckle* são sugeridos e são apresentados os progressos tecnológicos que poderão contribuir para a sua realização.

1.3 – DA INTERFERÊNCIA À INTERFEROMETRIA DE SPECKLE

A natureza electromagnética da luz é conhecida desde o final do século XIX, devido ao trabalho de J. C. Maxwell [1]. Apoiando-se em trabalhos anteriores realizados por Oersted, Faraday e Henry sobre as relações entre electricidade e magnetismo, Maxwell concluiu que a luz é uma perturbação electromagnética que se propaga sob a forma de ondas a uma velocidade finita que, no vazio, tem um valor aproximado de 3×10^8 m/s. Uma onda electromagnética corresponde à propagação simultânea de um campo eléctrico e um campo magnético perpendiculares que variam sinusoidalmente em fase. Para descrever a propagação de uma onda electromagnética, Maxwell propôs as seguintes equações:

$$\nabla^2 E = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad ; \quad \nabla^2 B = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

onde E e B representam, respectivamente, os campos eléctrico e magnético, ϵ_0 é a permissividade eléctrica do vazio, igual a $8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$, μ_0 é a permeabilidade magnética do vazio igual a $4\pi \times 10^{-7} \text{ N s}^2 \text{ C}^{-2}$, t é o tempo e o operador ∇^2 corresponde a:

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1.2)$$

As leis da Electrodinâmica clássica permitem prever que a energia se propaga continuamente através de ondas electromagnéticas. Contudo, as interacções electromagnéticas e os fluxos de energia podem também ser descritos como conjuntos de partículas elementares destituídas de massa, os fotões, que Max Planck designou por quanta de energia. A existência de fenómenos como a emissão e a absorção, que só o modelo quântico descreve consistentemente, fez com que as duas teorias acabassem por coexistir, sendo a luz explicada como consistindo de um fenómeno *dual* que apresenta características de onda e características de partícula.

Na maioria dos fenómenos ópticos são envolvidos fluxos de luz com energia suficiente para que não se manifeste a sua natureza discreta. Neste caso é o modelo ondulatório aquele que melhor se ajusta à sua descrição e a **interferência** um dos fenómenos que melhor atesta a sua natureza ondulatória. Este fenómeno consiste na redistribuição espacial da densidade de energia na região de sobreposição de dois ou mais feixes de luz.

Os princípios fundamentais da interferência da luz como resultado da soma de oscilações luminosas foram formulados por Young [2] e depois desenvolvidos por Fresnel [3], os quais podem ser considerados os fundadores da óptica ondulatória. A experiência da dupla abertura realizada por Young em 1802 confirma, de uma forma simples, o comportamento ondulatório da luz. Nesta experiência, uma fonte de luz é coberta por um alvo opaco onde existe um orifício de reduzidas dimensões. Com a fonte de luz pontual assim obtida é iluminado um segundo alvo provido de dois orifícios idênticos ao primeiro e separados de uma determinada distância. Obtêm-se assim duas fontes de luz pontuais que, na sua zona de sobreposição, criam um conjunto de franjas de interferência perfeitamente visíveis quando projectadas num alvo. Estas franjas, cujo número varia com a distância entre os orifícios, só existem quando a luz passa por ambos e não podem ser explicadas pela simples sobreposição das duas frentes de onda. De acordo com Young e Fresnel as franjas são devidas à soma das frentes de onda provenientes da mesma fonte de luz tendo em atenção as respectivas fases.

Em 1917, baseando-se na teoria onda/partícula para descrever a luz e na teoria estatística de Bose, Einstein deduziu as equações que descrevem a emissão estimulada de radiação [4]. Esta forma de emissão de radiação permite que um sistema atómico possa amplificar a radiação que o percorre. Einstein previu a possibilidade

de um tal fenómeno poder existir, caso certas condições particulares fossem preenchidas, nomeadamente a inversão de população dos níveis atómicos em relação à distribuição normal de Boltzmann. Apesar da descrição do fenómeno da emissão estimulada de radiação em 1917, foi apenas em 1960 que a teoria de Einstein foi provada. Em 1960 Mainman [5] descobriu que excitando com um feixe de luz branca muito intensa um cristal de rubi (crómio em corindo), este emitia uma radiação monocromática com um comprimento de onda de 6943 Å. Esta radiação luminosa, obtida por emissão estimulada, apresenta características de coerência que a distinguem da luz ordinária e foi designada por radiação **L.A.S.E.R** (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* - vulgarmente designada por *laser*). Com a descoberta do *laser* aumentou o interesse pelas técnicas de metrologia óptica e desenvolveram-se novos métodos, e técnicas, que exploram as características geométricas e ondulatórias desta radiação.

Apesar da dualidade onda/partícula necessária para descrever completamente a radiação luminosa, neste trabalho a luz será considerada uma onda electromagnética que se propaga num determinado meio óptico com uma velocidade finita. A única excepção a este pressuposto está contida nos capítulos 2 e 3 onde a teoria corpuscular intervém na descrição de sistemas atómicos que permitem realizar a emissão estimulada da radiação.

Paralelamente aos desenvolvimentos tecnológicos das fontes de luz, outros desenvolvimentos se verificaram no que se refere à forma de registar a informação contida nas frentes de onda. Dennis Gabor, em 1948 [6], havia proposto uma técnica de registo que permite gravar toda a informação presente numa frente de onda, isto é, as distribuições espaciais de amplitude e de fase - até então os registos de imagem eram exclusivamente em amplitude. Nesta técnica, que Gabor designou por **Holografia** [7] (do grego *Holos* - o todo), a fase da frente de onda é gravada em modulações de amplitude resultantes da interferência com uma frente de onda de referência. Do registo obtido, o holograma, é possível recuperar a frente de onda inicial, utilizando apenas o feixe de referência utilizado na gravação. A necessidade de utilizar uma fonte de radiação coerente fez com que esta técnica não tivesse tido, nessa altura, uma grande divulgação. De referir que a fonte de luz coerente mais utilizada era a lâmpada de vapor de mercúrio que, com o auxílio de filtros, permitia um comprimento de coerência de 0.03 a 0.2 mm. O reduzido comprimento de coerência da fonte de luz e a baixa resolução dos meios de registo de então apenas permitiam a gravação de hologramas em linha de objectos transparentes.

Com a descoberta do *laser*, com comprimentos de coerência que vão desde alguns centímetros até vários metros, ficou disponível a radiação ideal para esta aplicação. Leith e Upatnieks, em 1962 [8], retomaram as experiências de Gabor e pela primeira vez o registo e reconstrução da frente de onda foram explicados de acordo com a teoria das telecomunicações. Ao introduzirem uma portadora no registo da informação separaram espacialmente os termos com sinal do termo de ordem zero, permitindo assim a gravação de hologramas de objectos difusos. Em 1963 [9] estes dois investigadores publicaram o primeiro artigo em que o feixe de referência e o feixe objecto não eram coaxiais e em 1964 [10] registaram o primeiro holograma obtido por reflexão de objectos opacos tridimensionais. Depois destes trabalhos pioneiros, muitos grupos de

investigação se têm dedicado à utilização da Holografia nos mais variados domínios, tendo esta descoberta permitido que Dennis Gabor fosse agraciado com o prémio Nobel da Física em 1971.

Embora a Holografia deva parte da sua grande divulgação a ter sido encarada como curiosidade científica, devido à espectacularidade das imagens obtidas, alguns investigadores cedo se aperceberam das potencialidades desta técnica, nomeadamente em aplicações de metrologia óptica. Seguindo os trabalhos de Leith e Upatnieks, Powell e Stetson, dois investigadores da mesma equipa, publicaram em 1965 [11,12] um trabalho sobre a aplicação da **Interferometria Holográfica** ao estudo de vibrações. Nesse trabalho eram apresentadas imagens de padrões de franjas correspondentes aos diferentes modos próprios de um objecto de alumínio. Haines e Hildebrand, em 1966 [13], aplicaram pela primeira vez esta técnica ao estudo de deformações estáticas e publicaram a fundamentação teórica da análise dos padrões de franjas obtidos.

Após os trabalhos pioneiros de Powell e Stetson e Haines e Hildebrand, as técnicas de Interferometria Holográfica foram aplicadas com êxito a uma grande variedade de problemas metrológicos [14,15,16,17,18]. Contudo, a sua divulgação ficou muito aquém das expectativas geradas pelas potencialidades que esta técnica cedo revelou. Muita da relutância à sua utilização deveu-se ao meio utilizado no registo dos padrões de interferência. A emulsão fotográfica torna o processo de gravação moroso e a necessidade do processamento químico na revelação praticamente restringe a sua utilização aos laboratórios.

A substituição da emulsão pela câmara vídeo no registo dos padrões de interferência foi proposta de forma mais ou menos simultânea por três grupos distintos. Butters e Leendertz [19] em Inglaterra, Macovsky [20] nos Estados Unidos e Schowomma [21] na Áustria. Enquanto Macovsky e Schowomma desenvolveram esta técnica a partir da Holografia, o grupo inglês considerou-a como uma extensão das técnicas de *speckle* (granitado *laser*) designando-a por *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI). Esta técnica é também conhecida por outras designações como: Holografia-TV [22], Holografia Electro-Óptica [23], *Digital Speckle Pattern Interferometry* DSPI [24] ou Holografia Imagem Electrónica [25]. Uma variação destas técnicas é a Interferometria Diferencial, ou *Shearography* [26]. Todas estas designações, que correspondem a detalhes das configurações ópticas adoptadas por cada grupo, e que derivam da configuração da Interferometria Holográfica quando se utiliza um registo electrónico dos padrões de interferência, serão a partir de agora generalizadas como de **Interferometria de Speckle**.

Ao substituir a emulsão fotográfica, com uma resolução que pode ir até às 3000 linhas por mm, pelo alvo de uma câmara de vídeo cuja resolução é duas ordens de grandeza inferior, são impostas algumas limitações. A necessidade de aumentar o tamanho do *speckle* para o tornar compatível com a resolução do detector vídeo implica que o contraste das imagens resultantes seja muito inferior ao obtido com a Interferometria Holográfica. A informação registada é, no entanto, mais que suficiente para a maioria das aplicações onde aquela é normalmente utilizada. Mantendo a maioria das características da Interferometria Holográfica, a Interferometria de *Speckle* com registo em vídeo, tem como principal vantagem a possibilidade de gravar hologramas à frequência do vídeo (25 imagens/segundo no sistema vídeo europeu ou 30 imagens/segundo no sistema americano) sem necessidade de reposicionamento ou processamento químico. Uma vantagem

adicional, e não menos importante, é relativa aos procedimentos de segurança uma vez que o operador observa os resultados num monitor e não através de um feixe laser.

Estes trabalhos iniciais com as técnicas de registo electrónico de padrões de interferência de *speckle* abriram o caminho a vários grupos de investigação que viriam a ter uma importante contribuição para o desenvolvimento desta técnica. Pederson e Lockberg [27] na Noruega, Biedermann [28] na Suécia e Nakadate [29] no Japão foram alguns dos mais activos. Em Portugal o grupo de Óptica Quântica da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto foi pioneiro na utilização deste procedimento [30].

Com a evolução tecnológica foram desenvolvidos e aperfeiçoados vários equipamentos que tornaram as técnicas de Interferometria de *Speckle* com registo em vídeo acessíveis à maioria dos grupos de investigação. Os métodos de *speckle* permitem o processamento de informação de uma forma muito diferente da utilizada até então pelos registos holográficos, uma vez que não necessitam de reposicionamento para a reconstrução das imagens. Quer isto dizer que a evolução do padrão de franjas pode ser observada praticamente em tempo real evitando erros de reposicionamento. A obtenção dos padrões de franjas em suporte digital permite quantificar os deslocamentos recorrendo a cálculos realizados sobre as imagens. Esta capacidade é hoje muito utilizada no estudo do comportamento de materiais ou componentes estruturais em Mecânica Experimental [31,32,33,34,35,36,37].

Se os primeiros sistemas de registo electrónico foram realizados em sistemas vidicom o registo dos padrões de interferência passou a ser realizado, a partir de meados da década de 70, pelas câmaras de CCD (*Charge Coupled Devices*) [38]. Estes sistemas de registo alteraram completamente a forma de gravação das imagens e constituem a base da maioria dos sistemas de registo de imagem desenvolvidos nas duas últimas décadas. São várias as vantagens da utilização dos CCD's em comparação com as emulsões fotográficas nomeadamente; uma maior sensibilidade à luz, podem utilizar-se numa gama do espectro electromagnético que vai dos raios-X aos infravermelhos próximos e têm uma versatilidade de construção que permite adaptá-los às mais variadas situações. Acresce ainda o facto de os circuitos necessários serem fabricados através das técnicas básicas de produção de semicondutores o que os torna relativamente baratos, simples e robustos. Estes sistemas são constituídos por elementos discretos, *pixels*, consistindo em pequenos condensadores com capacidade para converter a energia luminosa em carga eléctrica. Uma matriz quadrada de *pixels* com poucos mm de lado colocada no plano de imagem de uma lente permite obter um sinal eléctrico com o registo da informação contida numa imagem. Obtém-se assim um sinal vídeo convencional com câmaras de registo discreto muito compactas e de reduzidas dimensões.

A evolução recente destes sistemas de registo de imagem tem-se verificado em duas direcções distintas. Aumento da resolução dos detectores (por aumento da quantidade de pixels na mesma área de leitura) e maior versatilidade na forma de leitura dos registos (utilização de leitura *frame-transfer*, *interline*, etc.). Assim, se os primeiros CCD's utilizavam matrizes de poucas centenas de pixels, quer por linha, quer por coluna, os existentes em meados da década de 90 atingiam já os 2024 x 2024. Para além disso, a forma de leitura dos registos electrónicos também evoluiu e actualmente diferentes formas são propostas *interline* ou *frame-transfer*.

Os actuais CCD's digitais de alta-resolução (2048h x 2048v pixels) existentes no mercado dispõem ainda de uma evolução tecnológica importante que é o registo assíncrono de imagem. Com esta possibilidade as imagens podem ser registadas quando o utilizador entender e não à frequência imposta de 25 Hz (sistema europeu) ou 30 Hz (sistema americano). A combinação destes factores permite construir sistema de Interferometria de *Speckle* que permitem a sua utilização com lasers de impulso, registando imagens temporalmente separadas por tempos da ordem de poucos micro segundo. Com estes sistemas é possível registar electronicamente fenómenos dinâmicos transientes com elevada resolução [39,40,41].

Para o processamento e registo dos sinais vídeo apareceram as memórias digitais compatíveis com o barramento de qualquer computador pessoal. Este *hardware* permite efectuar várias operações em tempo real, processar imagens e armazená-las directamente na memória do computador. A elevada capacidade de cálculo e o *hardware* disponíveis permitem utilizar algoritmos de interpretação rápida de padrões de franjas, como o cálculo e desmodulação de fase, mesmo quando se utilizam funções matemáticas pesadas (ex: Fast Fourier Transform - FFT). Deve referir-se que a grande maioria dos cálculos de fase de padrões interferométricos apresentados nesta tese foi obtido recorrendo ao cálculo de FFT's.

Nas últimas décadas a quantidade de *lasers* existentes aumentou de forma exponencial, e os seus desempenhos não pararam de melhorar. No entanto, os progressos não se fizeram sentir da mesma forma em todo o campo tecnológico. Alguns tipos de laser, nomeadamente de He-Ne, Árgon, Rubi e Neodímio, já atingiram uma fase de maturidade extremamente elevada. Outros estão ainda numa fase em que se procura melhorar o seu desempenho, como é o caso dos lasers de excímero. Nestes, os construtores continuam a fazer esforços para os trazerem para o mundo da indústria. No entanto, a utilização de halogéneos em *lasers* de gases raros ainda não atingiu a fiabilidade suficiente que permita a sua utilização industrial [42]. Para além destes desenvolvimentos mais próximos do mundo prático, outros existem em fase laboratorial. O *laser* de plasma e o *laser* de raios-X são disso dois exemplos [43]. Este último teve origem na Iniciativa de Defesa Estratégica (SDI) lançada no final da década de 80 para criar lasers capazes de destruir mísseis balísticos. Estes lasers utilizavam cargas termonucleares para excitar o meio activo para que o efeito laser pudesse ser mantido em meios atómicos densos! Actualmente são utilizados lasers como o NOVA, capaz de gerar energias de cerca de 20 KJ em 1 ns, para excitar o meio activo deste laser.

Uma das tecnologias laser que continua com acentuado progresso é a dos semicondutores. Novas estruturas têm surgido permitindo potências mais elevadas e modulações mais rápidas, ao mesmo tempo que se atingem novos comprimentos de onda. Prevê-se que estes sistemas venham a conquistar uma parte importante do mercado dos lasers de He-Ne em aplicações que não requerem radiação visível. A realização de díodos laser a comprimentos de onda visível continua, porém, aquém do esperado no que se refere a aplicações de Interferometria de *Speckle*. No entanto, nos últimos tempos, diferentes fabricantes lançaram produtos capazes de criar radiação coerente visível através de díodos. Estes, apesar de uma menor estabilidade espectral, podem contudo ser utilizados em montagens onde os comprimentos de coerência das fontes luminosas não necessitem de ser elevados, como é o caso da *Shearography* [44].

Em relação aos lasers de emissão contínua com aplicações na metrologia, por exemplo os de Nd:YAG ou Nd:YVO₄, estes sistemas permitiram a substituição dos nada práticos lasers de Árgon, volumosos, ineficientes e necessitando de arrefecimento a água, por sistemas mais eficientes com arrefecimento a ar e bombeados por matrizes de díodos laser. A nova geração de lasers de Nd:YVO₄ possuiu melhores propriedades de coerência e estabilidade do feixe, são mais pequenos, compactos e baratos.

Por sua vez os lasers de Nd:YAG têm vindo a conquistar uma fatia cada vez maior nas aplicações com emissão pulsada. Com efeito estes lasers podem ser construídos não só para sistemas contínuos mas também para sistemas pulsados, que podem atingir as dezenas de kHz. Assim, após algumas décadas, as aplicações da Interferometria de *Speckle* aos fenómenos dinâmicos já não se restringem à utilização do laser de Rubi [45]. Com efeito, mesmo em estaleiro, os lasers de Nd:YAG são hoje utilizados com frequência [41].

Os lasers pulsados são utilizados na medição de deslocamentos ou deformações devidas a fenómenos dinâmicos, sobretudo quando é necessário obter uma resolução da ordem da fracção de micro-metro ou quando os ensaios são realizados em ambientes industriais. Na verdade, em Interferometria de *Speckle* pulsada, são registados dois estados da estrutura a analisar em dois instantes sucessivos (dupla-exposição). Os principais parâmetros que vão influenciar a medida são:

- o deslocamento dos diferentes pontos da estrutura durante cada exposição.
- o deslocamento relativo de cada ponto entre os dois instantes.

Quanto ao primeiro parâmetro, é preciso registar o holograma da estrutura garantindo condições de estabilidade; isto é, o movimento relativo da estrutura deverá ser inferior a $\lambda/10$, durante o registo. Ao utilizar um laser pulsado os tempos de duração dos impulsos será de 20 ns para os lasers de Rubi e de 10 ns para os lasers de Nd:YAG. Até uma velocidade de deslocamento de alguns m/s nenhuma precaução especial é necessária para fixar o instante do fenómeno a estudar.

Para o segundo parâmetro, controla-se a amplitude do deslocamento relativo entre dois estados, de forma a evitar a decorrelação entre as duas frentes de onda. O intervalo entre impulsos é ajustado de acordo com a velocidade do fenómeno em estudo. A título de exemplo indica-se que para os lasers de Rubi, este intervalo de tempo é regulável entre 1 μ s e 800 μ s. Para uma velocidade de 7 m/s obtém-se uma amplitude de 7 μ m para 1 μ s de Δt , o que, em princípio, não coloca problemas.

Assim, combinando tempos de exposição curtos e intervalos de tempo entre impulsos no domínio do micro-segundo, é possível caracterizar o comportamento dinâmico de uma estrutura ultrapassando os problemas com vibrações parasitas. Não é necessário por isso utilizar mesas anti-vibração e podem realizar-se medições em estaleiro. Esta é a principal vantagem da utilização dos lasers de impulsos que, combinados com sistemas electrónicos de registo de imagem permitem a construção de sistemas compactos e portáteis de medição que podem ser utilizados fora dos laboratórios.

O cerne deste trabalho consiste na exploração das possibilidades de medida, no âmbito da Mecânica Experimental, permitidas pelos novos equipamentos disponíveis. A utilização das novas tecnologias de processamento de imagem e de lasers pulsados, combinando lasers de impulso e câmaras de CCD com gravação assíncrona, conduziram a um conjunto de resultados inovadores na utilização de sistemas de

Interferometria de *Speckle* na caracterização de fenómenos dinâmicos. Nesta tese são apresentadas soluções baseadas na aplicação destas técnicas a problemas da Mecânica Experimental intimamente ligados a problemas da indústria como, por exemplo: as análises modais de um altifalante e de um componente de turbina de avião, a análise dinâmica de componentes de um motor de automóvel, a caracterização da propagação de ondas de choque em placas metálicas e o controlo não destrutivo de estruturas. Estas aplicações serão tratadas em detalhe no capítulo 6 e 7.

Por último deve referir-se ainda que uma das características das técnicas de Interferometria Holográfica que não favoreceu a sua divulgação tem a ver com a dificuldade na interpretação dos resultados quando utilizadas por técnicos menos qualificados. Durante muito tempo a informação obtida com estas técnicas era utilizada apenas como informação qualitativa e interpretada por especialistas em óptica. A utilização de sistemas de Interferometria de *Speckle* e a associação destes às técnicas de processamento de imagem e de modulação de fase permitiu tratar de forma expedita grandes quantidades de informação e conceber sistemas que permitem a obtenção de resultados quantitativos e de fácil interpretação. O aparecimento e comercialização de sistemas portáteis chave-na-mão com análise automática dos resultados permitiram que esta técnica fique ao alcance de operadores com um mínimo de preparação em óptica.

Actualmente é grande a competição entre sistemas comerciais de Interferometria de *Speckle*, sobretudo no que diz respeito ao caso particular da técnica de *Shearography*. Esta técnica tem encontrado uma importante aplicação ao Controlo Não Destrutivo (CND). O primeiro sistema comercial de *Shearography* apareceu nos Estados Unidos em 1980 [46], através da companhia LTI (Laser Technology, Inc.) que adquiriu a patente do sistema de *Shearography* inventado por Hung. Rapidamente esta técnica foi alvo de atenção por parte da indústria. A indústria aeronáutica foi aquela que mais atenção dedicou a esta técnica, devido às novas possibilidades de Controlo e inspecção Não Destrutiva dos componentes em materiais compósitos. Como resultado deste interesse foram vários os projectos inter-comunitários, financiados pelo programa BRIT- EURAM, aprovados pela Comissão Europeia neste domínio de investigação. O Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental do INEGI foi um dos laboratórios que, desde o início da década de 90, se envolveu em diferentes projectos europeus com o objectivo de desenvolver as técnicas de Interferometria de *Speckle* e, em particular a *Shearography*. Para isso foi preponderante a visão de futuro do Prof. Francisco Silva Gomes, na altura Director da unidade LOME do INEGI, que apostou nestas técnicas no momento em que estas despontavam. O LOME pode hoje ser apontado como uma referência nacional e europeia na aplicação dos métodos de Interferometria de *Speckle* ao estudo do comportamento dos materiais e ao Controlo Não Destrutivo.

Os novos caminhos a percorrer para as técnicas de Interferometria de *Speckle* têm como base os desenvolvimentos na área da electrónica de processamento de imagem e a sua posterior integração em sistemas de Holografia-TV ou *Shearography*. Na verdade, mesmo as propostas mais inovadoras no campo das configurações interferométricas, como é o caso do cálculo de fase em tempo quasi-real, proposta pelo grupo de investigação da Universidade de Delft, baseiam-se sobretudo na rapidez de cálculo possibilitada pelos desenvolvimentos na área da electrónica de processamento de imagem. Também a nova configuração

apresentada nesta tese para o interferómetro de *Shearography*, baseado na montagem proposta por Mach-Zehnder, e utilizada pela primeira vez no controlo dinâmico não-destrutivo, teve como suporte uma nova câmara de CCD com registo assíncrono de imagens.

Os sistemas de registo CCD fabricados com a tecnologia C-MOS, que começaram a aparecer no mercado no final dos anos 90, serão a chave para o aumento da gama dinâmica de medida destas tecnologias. Estes novos sensores, que podem desde já ser divididos em activos ou passivos, fornecem possibilidades até agora inexistentes. A possibilidade de, por exemplo, endereçar independentemente cada um dos elementos sensores de imagem permitirá que a cada pixel seja imposto um factor de ganho para que as zonas menos iluminadas da imagem sejam compensadas. Este facto permitirá obter uma maior uniformidade de leitura dos padrões interferométricos, evitando o recurso a elementos ópticos para converter um feixe gaussiano numa iluminação uniforme. Um projecto europeu está em curso, financiados pelo 5º Programa Quadro de Investigação e Desenvolvimento, INCA, em que parte dos objectivos a alcançar se prendem com a verificação da aplicabilidade destes novos sensores de imagem em sistemas de Interferometria de *Speckle*.

Os desenvolvimentos futuros na área dos lasers com influência sobre as técnicas de Interferometria de *Speckle* serão sobretudo na área da miniaturização e no aumento das potências de saída em modo TEM₀₀.

1.4 - APLICAÇÕES DA INTERFEROMETRIA DE SPECKLE

Os interferómetros clássicos (Michelson, Mach-Zehnder, ...) são utilizados para medir pequenas variações de caminho óptico em superfícies polidas ou observadas por reflexões especulares, sejam estas planas ou de revolução. A holografia permitiu estender as medições interferométricas aos objectos difusos e tridimensionais com as mais variadas geometrias.

As técnicas de Interferometria Holográfica, e em particular as de Interferometria de *Speckle*, têm vindo a ser utilizadas com sucesso nas áreas da Mecânica Experimental ao longo das duas últimas décadas. Estas técnicas são totalmente não intrusivas, não destrutivas e permitem a medição global, sem contacto, dos campos de deslocamentos com resolução sub-micrométrica. Na verdade, tudo o que se deforma na natureza é, em princípio, susceptível de ser analisado pela Interferometria Holográfica: desde a deformação de um tímpano por acção de um *bang* supersónico até à deformação dos elementos de um motor em funcionamento, passando pelo crescimento de cristais ou pelas variações de densidade do ar em torno de um perfil de asa de avião [31].

As primeiras aplicações das técnicas de Interferometria Holográfica surgiram no campo da Mecânica Experimental em 1965 publicadas por Powell e Stetson [11,12]. Estes dois investigadores verificaram que se durante a gravação do holograma o objecto vibrasse harmonicamente numa das suas frequências naturais de vibração se obtinha um conjunto de franjas correspondente ao modo natural de vibração. Este tipo de

gravação de holograma que foi designado por gravação em *time-average* permite obter o mapeamento espacial da amplitude de vibração embora o padrão de franjas venha modulado por uma função de Bessel de ordem 0 e se perca a informação de fase da vibração.

Sendo a primeira aplicação destas técnicas no campo da Mecânica Experimental, este método de correlação de registos holográficos revelou-se de grande utilidade na análise modal de componentes estruturais pois permite obter os modos naturais de vibração de uma estrutura de forma expedita e sem necessidade de colocar qualquer transdutor sobre o objecto. Esta característica é muito importante ao analisar estruturas de massa reduzida, pois qualquer transdutor pode alterar completamente o seu comportamento dinâmico ao alterar a distribuição de massa. Na figura 1.1 pode observar-se um dos modos de vibração de um componente de um motor de automóvel obtido por Holografia-TV com registo em *time-average* [47].

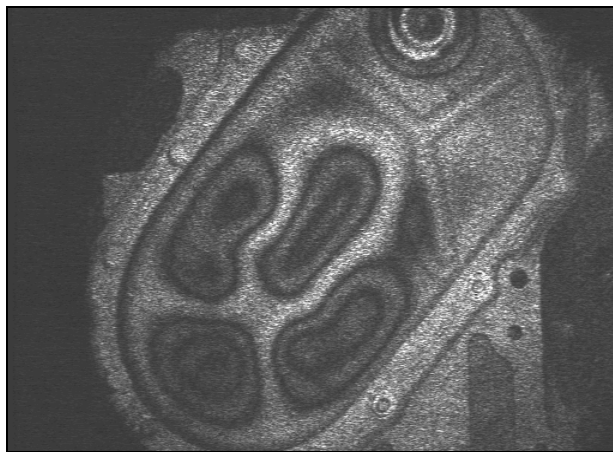


Figura 1.1 – Obtenção de um modo natural de vibração de um componente de motor de automóvel.

A obtenção dos padrões de franjas de interferência pode também ser conseguida correlacionando dois registos holográficos de um mesmo objecto mas em duas situações diferentes, isto é, antes e depois de lhe ser aplicada uma carga. Quando a evolução das franjas durante o carregamento do objecto é acompanhada diz-se que a correlação se faz em tempo real, quando o padrão de franjas é obtido por comparação de dois registos distintos trata-se de uma correlação em dupla exposição. Este último método pode ser utilizado em situações estáticas ou quasi-estáticas e em situações dinâmicas e transientes de elevada velocidade quando são utilizados lasers de emissão pulsada. De ambas as técnicas de correlação resultam padrões de interferência com franjas sinusoidais que correspondem a zonas da superfície que sofreram deslocamentos de igual amplitude. A obtenção do valor do deslocamento verificado passa pelo cálculo da fase do padrão de franjas e pelo conhecimento prévio do vector de sensibilidade do interferómetro utilizado.

Por sua vez, o vector sensibilidade depende da orientação dos feixes de iluminação do objecto e da direcção em que este é observado e pode ser orientado de várias formas de acordo com a medição que se pretende realizar. Com uma orientação conveniente da montagem óptica é possível realizar não só a medição do

campo de deslocamentos *no-plano* do objecto e *fora-do-plano* deste mas também a medição do campo de deformações [48,49,50].

Um exemplo de aplicação destas técnicas em Mecânica Experimental consiste na caracterização do campo de deslocamentos na vizinhança de uma fenda parcial. Trata-se de um problema típico da Mecânica da Fractura em que é necessário caracterizar os deslocamentos *no-plano* e *fora-do-plano* para obter a informação necessária à determinação do factor de intensidade de tensão desta singularidade geométrica [51]. Na figura 1.2 representam-se os campos de deslocamentos obtidos com Holografia-TV *no-plano* e *fora-do-plano* na vizinhança de uma fenda de penetração parcial.

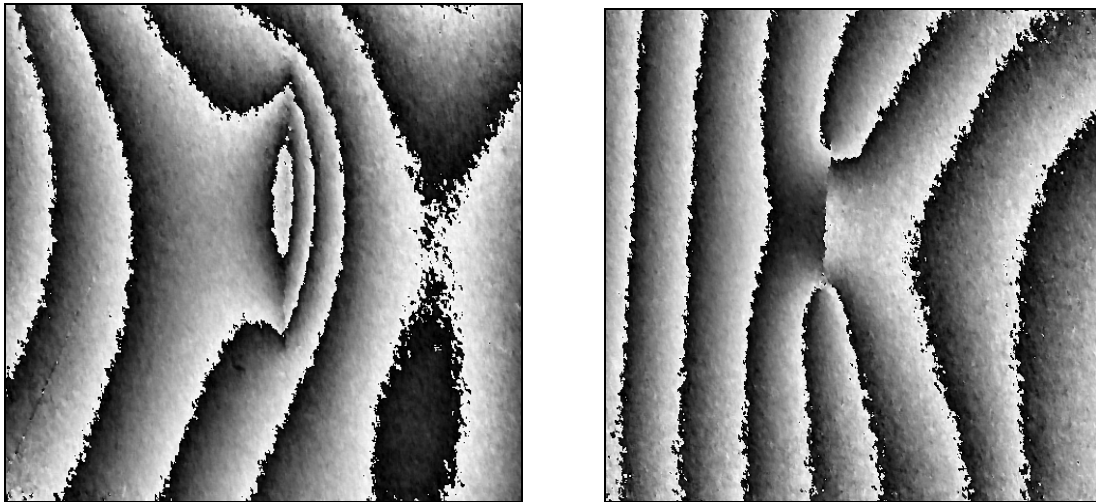


Figura 1.2 – Medição do campo de deslocamentos *no-plano* e *fora-do-plano* na vizinhança de uma fenda de penetração parcial numa placa submetida a tracção no plano segundo a direcção normal ao plano da fenda.

O outro exemplo de aplicação destas técnicas, realizado ao longo da elaboração deste trabalho, refere-se à caracterização da rigidez de parte de uma estrutura articulada construída em materiais compósitos de elevado desempenho. Esta estrutura é utilizada na construção de um suporte para detectores de radiação do novo acelerador de partículas do CERN, designado por LHC (*Large Hadron Collider*). Dadas as elevadas velocidades atingidas pelas partículas produzidas durante as colisões, fracções da velocidade da luz, é exigida uma grande estabilidade dimensional no posicionamento dos detectores (que poderá ser de alguns *microns* em comprimentos de vários metros). Para reduzir o peso dos componentes, mantendo elevada rigidez, são seleccionados materiais compósitos de grande estabilidade dimensional que associem elevadas propriedades mecânicas a uma baixa massa específica. Para esse efeito são desenvolvidos novos materiais compósitos, fortemente ortotrópicos, cujas características mecânicas são orientadas de acordo com as solicitações a aplicar aos componentes. Sendo assim, o recurso a técnicas que permitam avaliar o comportamento global da estrutura sob solicitação é de importância crucial. Na figura 1.3 apresenta-se a distribuição de fase do campo de deslocamentos no plano obtido sobre um protótipo da estrutura quando este

é traccionado simetricamente. Estes resultados permitiram verificar que as soluções numéricas obtidas na simulação da estrutura com códigos de elementos finitos eram demasiados optimistas [52].

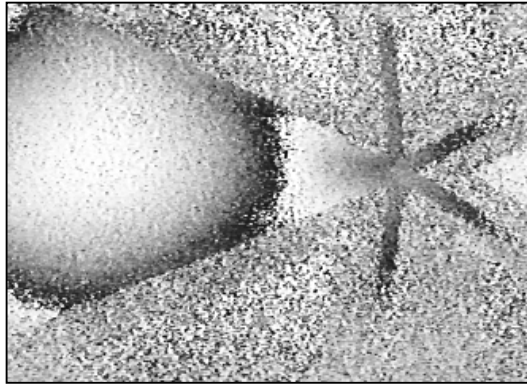


Figura 1.3 – Campo de deslocamentos *no-plano* numa célula de uma estrutura em material compósito.

Uma das áreas onde estas técnicas têm também vindo a ter uma crescente aplicação é a Biomecânica. Os trabalhos realizados no LOME para avaliação do comportamento de implantes em odontologia ou na optimização de próteses da anca [53,54] são exemplos de aplicação das técnicas de Interferometria de *Speckle* neste domínio. A utilização destas técnicas, conjuntamente com rotinas de processamento de imagem, permite a medição de campos de deslocamentos/deformações de forma muito precisa, permitindo até a caracterização da interacção implante estrutura óssea. O LOME tem apresentado alguns trabalhos nesta área realizados em colaboração com outras instituições como, por exemplo: o Queen Mary's Hospital de Londres, referente à implantação de próteses da anca, e um outro com investigadores da Faculdade de Medicina Dentária da Universidade do Porto referente à implantação de próteses dentárias.

O estudo das próteses de anca permitiu a obtenção de um conjunto de resultados muito importantes relativos à rigidez da implantação e as deformações de contacto induzidas. Assim as técnicas de Interferometria de *Speckle* permitiram otimizar o projecto deste tipo de próteses de forma a alterar a sua rigidez e uniformizar as tensões de contacto com o tecido ósseo. Na figura 1.4 representa-se um conjunto de resultados obtido com estas técnicas no estudo da *interface* osso esponjoso implante da anca. As imagens mostram o mapa de fase obtido para o campo de deslocamentos no plano e a distribuição das deformações obtida após a derivação do campo de deslocamentos.

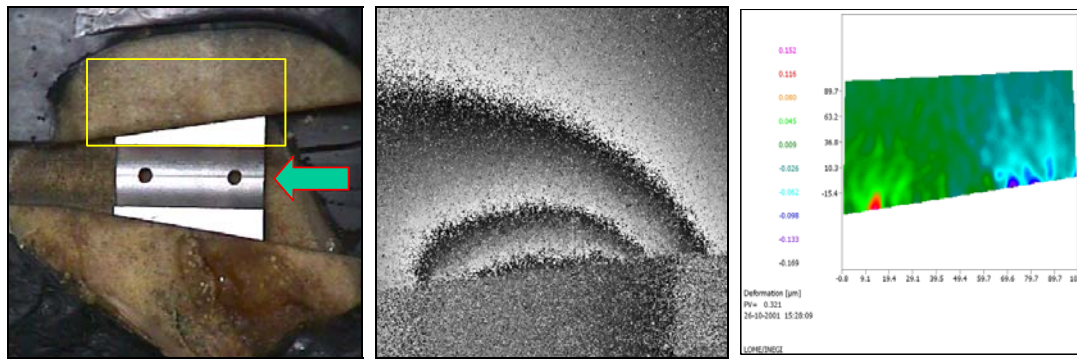


Figura 1.4 – Estudo da distribuição de tensões na *interface* prótese/osso esponjoso [54].

Os resultados apresentados demonstram como estas técnicas permitem uma fácil identificação da localização dos gradientes correspondentes a concentração de tensões. Montagens mais elaboradas poderiam utilizar-se para medir em simultâneo os deslocamentos segundo três direcções não paralelas e obter o valor real dos deslocamentos.

A técnica vulgarmente designada por *Shearography* é uma variação da configuração interferométrica clássica da Holografia-TV. Aqui, um único feixe é utilizado na iluminação do objecto sendo a imagem deste, recolhida por um sistema óptico, dividida em duas frentes de onda de igual amplitude e sobrepostas sobre o foto-detector transladadas lateralmente uma em relação à outra, *sheared*. Estas duas frentes de onda interferem sobre o sensor de imagem da câmara de vídeo produzindo um padrão de interferência que é registado electronicamente. Obtém-se assim o registo holográfico. Da correlação entre um par de registos holográficos resulta um padrão de interferência no qual cada franja representa um contorno de igual gradiente de deslocamento na direcção normal ao plano. Quer isto dizer que se trata de uma técnica sensível à deformação da superfície que é obtida da derivada do deslocamento.

A *Shearography* foi inicialmente proposta como uma forma de determinar o campo de deformações de estruturas em solicitação estática sem necessidade de recorrer à derivação numérica do campo de deslocamentos [55,56,57,58]. A simplicidade da montagem óptica e o facto de se tratar de um interferómetro em que ambos os braços têm um percurso comum em grande parte do seu caminho, permite obter montagens compactas e com elevada estabilidade mecânica. Este facto, aliado à possibilidade de detectar facilmente gradientes de deslocamento com uma baixa sensibilidade a movimentos de corpo rígido, fez com que esta técnica tivesse enorme divulgação no Controlo Não-Destrutivo.

As imagens da figura 1.5 ilustram uma aplicação desta técnica, na determinação do campo de deformações de um componente aeronáutico, para identificar zonas com defeitos estruturais internos provocados por impactos com corpos rígidos. A estrutura em estudo, parte de uma fuselagem construída em material compósito, correspondendo à cobertura traseira de um helicóptero NH90, foi sujeita a impactos de diferentes energias [59].

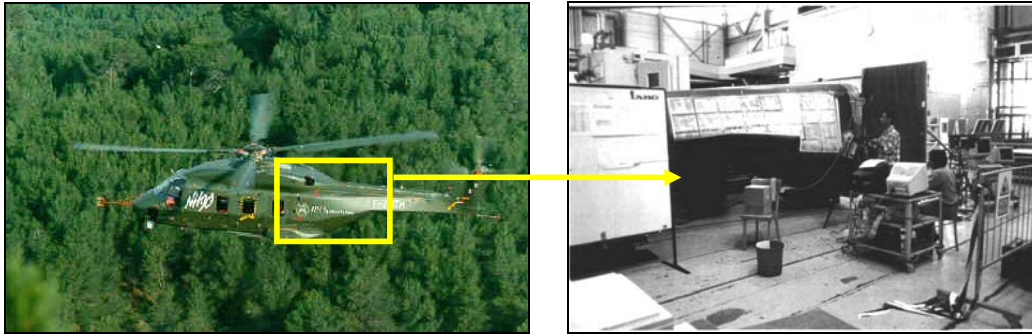


Figura 1.5 – Helicóptero NH-90 e ensaios em estaleiro realizados no IABG na Alemanha sobre a cauda em material compósito utilizando o sistema de *Shearography* desenvolvido no LOME.

Na figura 1.6 pode observar-se o mapa de fase obtido numa zona em que existia um conjunto de defeitos internos devido a impactos múltiplos. Neste mapa de fase é possível identificar claramente as regiões em que existem gradientes de deslocamentos devidos a uma deformação não uniforme da superfície.

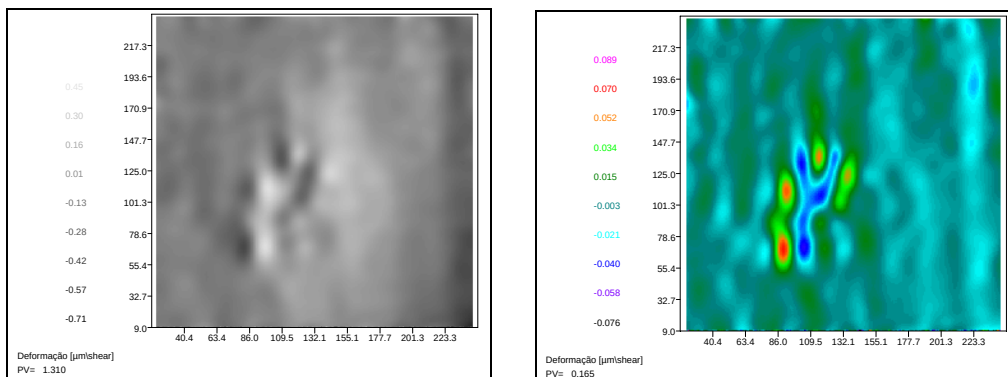


Figura 1.6 – Mapa de fase e mapa de fase codificado em falsa cor obtidos para uma área onde existe um conjunto de defeitos provocados por múltiplos impactos num componente em material compósito.

Do que anteriormente foi dito pode concluir-se que as técnicas de Interferometria de *Speckle* são técnicas de elevada resolução e fácil aplicação com elevado potencial para aplicações no âmbito da Mecânica Experimental. A possibilidade de caracterizar de forma expedita o campo de deslocamentos existente na superfície de um objecto por acção de um dado carregamento ou analisar com rigor o seu comportamento dinâmico, permite ainda recolher informação de grande utilidade para outras aplicações, nomeadamente a caracterização das constantes elásticas de materiais ortotrópicos [60,61].

Na figura 1.7 estão representadas dois modos de vibração de uma placa de material compósito, obtidos por *time-average*. Trata-se de uma placa com uma distribuição não uniforme de fibras que permitiu obter um componente fortemente ortotrópico. No lado esquerdo estão representadas as formas modais obtidas por cálculo numérico enquanto do lado direito se representam as mesmas formas modais obtidas por *time-average*.

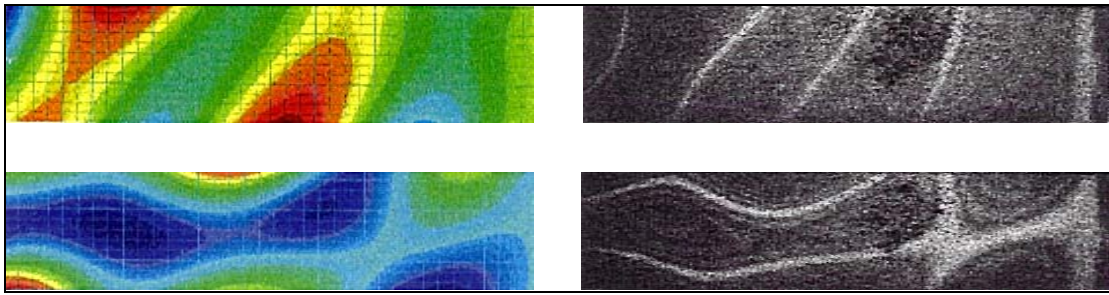


Figura 1.7 – Formas modais de um laminado de carbono com propriedades ortotrópicas. Cálculo numérico e medição experimental por Holografia-TV em *time-average*.

Nas duas imagens pode observar-se que as direcções de ortotropia se encontram inclinadas em relação aos lados da placa. Esta encontrava-se encastrada pelo seu bordo direito.

A Interferometria de *Speckle* pode também ser aplicada ao estudo de fenómenos dinâmicos sinusoidais ou transientes [62,63,64,65]. No caso das vibrações harmónicas pode utilizar-se o registo em *time-average* ou em dupla exposição com lasers pulsados. No caso do registo em *time-average* são integrados vários ciclos de vibração em cada registo perdendo-se a informação respeitante à fase do movimento. Neste caso o recurso a técnicas de modulação sinusoidal do feixe de referência permitirá, embora com uma montagem mais complexa, visualizar com rigor o comportamento dinâmico do objecto. Neste tipo de medição a Interferometria de *Speckle* é particularmente bem adaptada ao estudo do comportamento dinâmico de estruturas de massa reduzida onde a colocação de qualquer transdutor altera substancialmente o comportamento do componente. Na figura 1.8 representa-se um dos modos de vibração de uma placa de material compósito encastrada ao longo dos seus bordos menores. A perda de simetria do modo em causa deve-se ao facto da espessura da placa variar ao longo da largura [47].

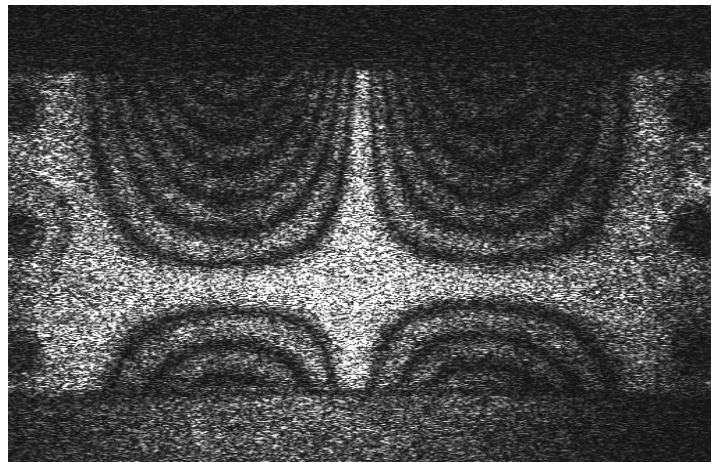


Figura 1.8 – Modo de vibração de placa de material compósito encastrada ao longo dos seus dois lados menores.

A utilização de lasers de impulsos no estudo de fenómenos harmónicos substitui, com vantagem, as técnicas baseadas no registo em *time-average* através de lasers contínuos. Recorrendo ao registo em dupla exposição

é possível obter uma caracterização do comportamento do objecto entre dois instantes distintos. Conhecidos os instantes de disparo do laser e a evolução temporal do fenómeno pode obter-se uma medição da amplitude e da fase da vibração [66,67]. Os padrões de franjas assim obtidos têm uma intensidade variando sinusoidalmente, que é proporcional ao deslocamento do objecto. Neste tipo de padrões é possível realizar cálculos de fase com algoritmos baseados na introdução de portadoras espaciais nos padrões de interferência. Mais adiante neste trabalho serão apresentadas algumas aplicações destas técnicas.

Fenómenos rápidos, como a propagação de ondas de tensão em sólidos, podem ser estudados através da Interferometria de *Speckle* recorrendo à utilização de fontes de luz pulsada. Gottemberg demonstrou que o uso de um laser de Rubi em funcionamento *Q-Switch* era adequado à medição do deslocamento de uma viga de alumínio em resposta à compressão gerada pelo impacto de uma bala [68]. Um exemplo de aplicação desta técnica apresentado neste trabalho é a análise da propagação de uma onda de flexão gerada numa placa por impacto com um objecto rígido.

A utilização de detectores CCD, introduzida no início da década de setenta, esteve até meados da década de 90 limitada à utilização em fenómenos não transientes. A partir de meados da década de 90, o aparecimento de câmaras CCD com registo assíncrono de imagens permitiu estender a gama de aplicações destes dispositivos ao estudo de fenómenos transitórios [69]. A Interferometria de *Speckle* passou então a poder substituir as técnicas de Interferometria Holográfica clássicas na sua globalidade. Este foi mais um passo no caminho da aplicação industrial destas técnicas. Um projecto europeu, designado por PDHS - *Pulsed Digital Holography and Shearography*, foi financiado com o objectivo de estudar a aplicabilidade de sistemas de Holografia-TV, com registo assíncrono de imagens, ao estudo de fenómenos transitórios. O LOME foi um dos laboratórios europeus envolvidos neste projecto, sendo o trabalho desenvolvido a base para a realização desta tese. Na figura 1.9 representa-se parte do sistema construído no âmbito deste projecto que é comercializado pela empresa *Ettemeyer*. Na mesma figura pode ainda ser observada uma representação dos resultados obtidos numa medição.

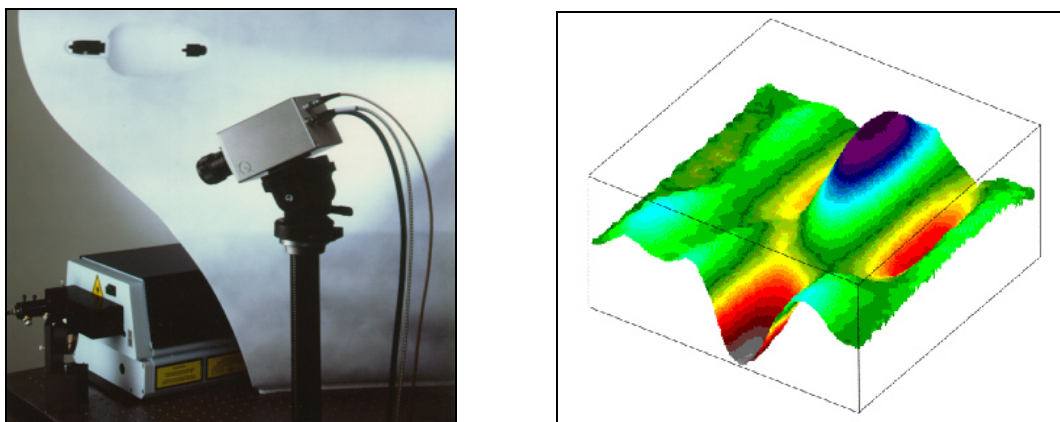


Figura 1.9 – Sistema de Holografia-TV pulsada desenvolvido no âmbito do projecto europeu PDHS, comercializado pela empresa *Ettemeyer*. Modo de vibração de parte de uma porta de automóvel.

Os resultados representados na figura 1.9 referem-se à análise dinâmica de uma porta de automóvel vibrando sinusoidalmente.

O elevado potencial revelado pelas técnicas de Interferometria de *Speckle* no âmbito da Mecânica Experimental permitiu a sua divulgação entre a comunidade científica. As novas tecnologias de registo e processamento de imagem vieram contribuir para a sua divulgação em ambientes industriais. Contudo, ainda actualmente são encontradas novas aplicações à Mecânica Experimental só possíveis por estar disponível uma técnica de medição com as características da Interferometria de *Speckle*. Um exemplo do que acaba de ser dito são as novas técnicas de caracterização de vibrações baseadas na determinação da intensidade estrutural. Neste caso as técnicas de Interferometria de *Speckle* com lasers pulsados são utilizadas na obtenção da distribuição espacial da amplitude e fase de vibração, informação que é depois processada para calcular a intensidade estrutural [70,71]. Esta nova grandeza permite identificar os fluxos de energia mecânica durante a vibração. A obtenção de campos de deslocamento ou de velocidades permite derivar quantidades como a intensidade estrutural e a sua divergência que fornecem informação da estrutura relativa a fontes e dissipadores de energia.

Estas técnicas estão numa fase inicial do seu desenvolvimento e apresentam ainda algumas limitações. Embora a obtenção do campo de deslocamentos seja facilmente conseguida, a teoria da intensidade estrutural exige a determinação da 3ª e 4ª derivadas espaciais pelo que técnicas de processamento de imagem têm aqui um papel fundamental. O LOME esteve ligado ao desenvolvimento destas técnicas através da participação de alguns dos seus investigadores num projecto europeu designado por *Vibration Intensity Processing by Full-field Laser Multipulse Technique* - VIP. Deste projecto resultou um sistema de medida que utiliza um laser de impulsos e recorre a técnicas de cálculo de fase baseadas na introdução de uma portadora espacial no padrão de franjas primário [72].

Deve ainda referir-se que a associação das técnicas ópticas apresentadas neste trabalho com os métodos de cálculo numérico permite obter uma ferramenta de apoio ao projecto de estruturas e componentes. Existindo hoje um conjunto de ferramentas numéricas com aplicações nos mais diversos problemas de Engenharia continua a ser necessário dispor de técnicas experimentais que permitam validar novas aplicações ou controlar a aplicação dos métodos numéricos a novas soluções de projecto. As técnicas de Interferometria de *Speckle* podem utilizar-se para obter informação de referência ou ainda na validação dos métodos de simulação de determinadas condições de fronteira ou de carregamento.

As técnicas híbridas recorrem a uma combinação de técnicas experimentais e numéricas para obter resultados de forma mais expedita e com maior rigor. Esta designação aplica-se a combinações, entre técnicas experimentais e numéricas, em que existe intercâmbio de resultados nas fases intermédias do processo de cálculo. Desta forma é possível obter campo de deslocamentos pela via experimental e introduzir esses valores num cálculo numérico de tensões [47].

Por último refere-se a aplicação das técnicas ópticas à caracterização, sem contacto, de geometrias tridimensionais. Estas técnicas têm vindo a assumir uma especial relevância em situações onde pode utilizar-se um modelo numérico por caracterizar e produzir uma nova geometria [73,74]. Este é um campo com muito

interesse no projecto em Engenharia Mecânica e envolve disciplinas como: a protipagem rápida, o *reverse engineering* e o *design* industrial. O desenvolvimento de técnicas particulares de interferometria e de projecção de franjas permite a interpretação automática de formas e de objectos de um modo expedito. Estes métodos consistem na codificação da iluminação, luz estruturada, e na utilização de rotinas de processamento de imagem baseadas em técnicas de *Fast Fourier Transform* (FFT). Estas técnicas encontram aplicação em campos que vão desde o projecto de próteses em biomecânica até ao projecto de moldes para utilização com métodos de CAD/CAM, passando, evidentemente, pelas áreas de projecto no sector automóvel e aeronáutico.

Utilizados na produção, controlo de qualidade, I&D ou na concepção de novos produtos, os métodos de Interferometria de *Speckle* têm vindo a adquirir um lugar preponderante na indústria. Estes métodos capazes de fornecer uma ideia precisa do comportamento real, e global, de um componente mecânico ou de um fenómeno físico sem o perturbar (sem contacto) fornecem soluções para os problemas de vibração, rotura, medida de deformações e controlo não destrutivo. Da conjugação das suas vantagens podem atingir-se ganhos de rentabilidade e de desempenho para os seus utilizadores.

Exemplos de aplicação industrial encontram-se sobretudo em empresas ligadas às actividades aeronáuticas e automóvel. Assim a *EADS Launch Vehicles* utiliza estas técnicas diariamente no controlo de propulsores (fig.10a), a *Eurocopter* no controlo de pás de helicópteros, a *Snecma* e *Rolls-Royce* na análise modal de componentes de turbo-reactores; a *Northrop-Grumman* no controlo da fuselagem do avião B-2, a *Airbus* nas operações de manutenção dos *elevons* do Concorde, no controlo de fabricação dos *wing tips* dos ATR [75] e no controlo dos ailerons A380 de *flight tests* (fig. 10b). Outras empresas como a *Lockheed-Martin*, a *Boeing* ou a *BAE Systems* utilizam também estas técnicas nas suas actividades de Investigação e de Produção.



Figura 1.10 – a) Utilização da *Shearography* no controlo de colagem de um propulsor de missile balístico. b) Utilização da *Shearography* no controlo de danos de impacto dos ailerons do Airbus A380.

A *Michelin* e a *Bridgestone*, construtores de pneus para a aeronáutica, utilizam também a Interferometria de *Speckle* no controlo de produção de pneus. A *Renault* e o grupo *PSA* fazem uso da interferometria

holográfica para melhorar os desempenhos em termos de ruído de componentes de motores. Para além destas empresas, do extremamente competitivo sector aeronáutico e automóvel, a divulgação destas técnicas chegou já às empresas e instituições ligadas ao restauro de obras de arte como a *Tate Gallery* e o *Museu Uffizi* de Florença, que empregam estas técnicas na inspecção de pinturas [76]. Esta lista de empresas que possuem meios para realizar medições através da Interferometria de *Speckle* não é de forma alguma exaustiva.

Actualmente, não só as grandes empresas utilizam a Interferometria de *Speckle* na sua rotina diária de produção e manutenção, mas, as pequenas e médias empresas recorrem a esta ferramenta para a resolução de problemas pontuais, de que são exemplo a identificação de fontes de ruído nas estruturas, o controlo não-destrutivo, a análise modal, a medição de deformações dinâmicas, a afinação e validação de códigos de elementos finitos, contactando para esse efeito empresas e organismos especializados.

Em Portugal as Oficinas Gerais de Material Aeronáutico (OGMA) e a Força Aérea Portuguesa (FAP) são dois actores importantes nesta área, que mantêm com o LOME frequentes contactos acerca de aplicações desta técnica.

1.5 – PROCESSAMENTO DE IMAGEM

O processamento de imagem foi na última década a área que mais contribuiu para a divulgação da Interferometria de *Speckle*. O desenvolvimento de placas de processamento de imagem com melhores desempenhos; capazes de gerir toda a informação que é enviada pelas câmaras CCD de última geração (resolução mais elevada, *frame-transfer*, registo assíncrono,...) e o desenvolvimento de algoritmos de processamento de imagem dedicadas ao cálculo de mapas de fase permitiram que esta tecnologia passasse dos laboratórios para as aplicações industriais [77,78,79].

Estes métodos são baseados no processamento e análise das franjas de interferência que decorre das variações dos caminhos ópticos percorridos pelos feixes que interferem. Esta diferença de caminhos ópticos está geralmente associada à grandeza que a Interferometria de *Speckle* pretende medir – deslocamentos ou derivadas de deslocamentos e amplitudes de vibração.

O cálculo de fase permite que os padrões de intensidade registados no CCD se transformem em medições quantitativas da diferença de fase entre dois, ou mais, instantes da superfície de um objecto. Se os primeiros algoritmos, baseados na determinação dos centros das franjas, eram extremamente morosos e sensíveis a erros, os algoritmos de cálculo de fase baseados no *phase-shifting* ou no cálculo de FFTs são eficazes e extremamente rápidos. Estes permitem, de uma forma expedita e precisa, a obtenção do campo de deslocamentos, ou deformações, da superfície de um dado objecto. O cálculo de fase pode ser realizado para fenómenos lentos, através de técnicas de modulação temporal ou técnicas de modulação espacial. Em ambos os métodos é introduzida uma variação de fase conhecida que permite calcular a distribuição da fase dos

padrões de interferência. No entanto, quando se trata do cálculo de fase em situações dinâmicas este só pode ser obtido através da introdução de uma portadora espacial e a consequente utilização de técnicas de FFT para a determinação da fase. Como se explicará com mais detalhe no capítulo 4, estes algoritmos podem ser utilizados, quer em configurações de interferómetros que permitem que a frequência portadora seja introduzida nas franjas de interferência primárias, quer em configurações de interferómetros que permitem que a frequência portadora seja introduzida nas franjas de interferência secundárias.

A obtenção de **mapas de deslocamentos** ou de **deformações** directamente das medições interferométricas tornam estas técnicas extremamente atractivas na área da Mecânica Experimental. Com efeito, a possibilidade oferecida pela obtenção experimental de campos de deformações permite que por algoritmos de **diferenciação** se obtenham os campos de tensões de uma determinada estrutura sujeita a um tipo particular de carregamento.

Os últimos desenvolvimentos nos algoritmos de processamento de imagem consistem na eliminação de movimentos de corpo rígido que em muitas situações práticas de experimentação não podem ser evitados. A figura 1.11 apresenta um exemplo da aplicação deste algoritmo no domínio do Controlo Não Destrutivo. Uma estrutura *sandwich* com as peles em CFRP e o núcleo em Nomex®, contém três defeitos que são mais facilmente identificáveis quando se compensa o movimento de corpo rígido introduzido pela solicitação térmica da peça.

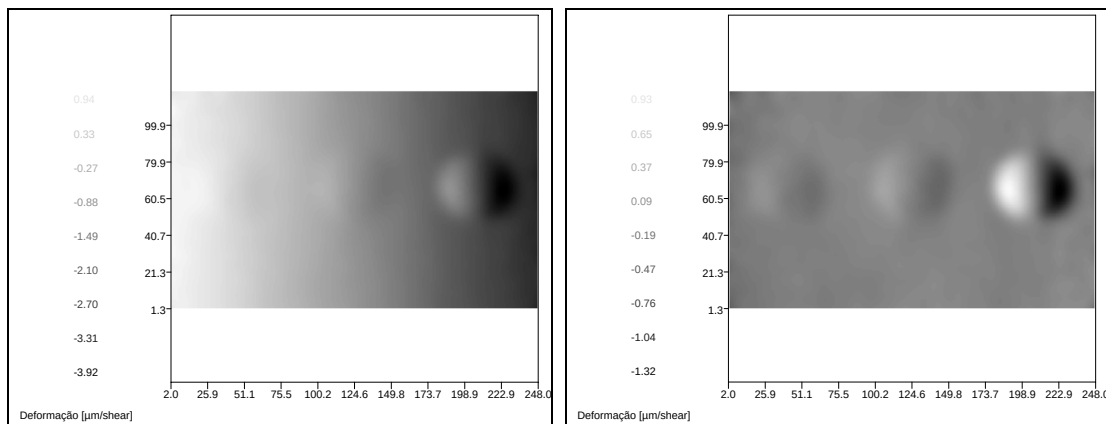


Figura 1.11 – Aplicação do algoritmo de compensação de movimento de corpo rígido num problema de detecção de defeitos numa estrutura *sandwich*, CFRP/Nomex®.

Esta capacidade dada pelo processamento de imagem permite que os ficheiros de dados obtidos experimentalmente possam ser introduzidos em códigos de Elementos Finitos para que haja uma maior correlação entre os valores previstos pela modelização do problema e os valores obtidos experimentalmente. Desta forma é possível utilizar uma solução híbrida para a resolução de um problema aproveitando a possibilidade de medir com rigor os deslocamentos reais da estrutura e calcular posteriormente a distribuição de tensões por eles gerada.

1.6 - CONCLUSÃO

A introdução de sistemas de Interferometria de *Speckle* em ambientes industriais revelou-se, no entanto, um processo lento até ao aparecimento dos sistemas de Interferometria de *Speckle*, com registo electrónico de imagem. Com efeito o facto de não se ter acesso ao resultado da inspecção imediatamente após a sua realização foi o factor que mais travou o progresso destas técnicas. Os sistemas compactos e portáteis surgiram pois da capacidade de registar os padrões de interferência electronicamente e da sua correlação poder ser observada em tempo quasi-real num qualquer monitor vídeo. Estes sistemas, que no início dos desenvolvimentos conseguiam a inspecção global de áreas da ordem de 10 cm x 10 cm, cobrem actualmente áreas da ordem de 1 m².

O advento das fibras ópticas foi outro factor que contribuiu para a realização de sistemas de Interferometria de *Speckle* mais compactos e portáteis. Se em aplicações laboratoriais a sua utilização não se revela tão necessária, em aplicações industriais a sua utilização é desejável, não só pela redução do volume dos sistemas ópticos mas também, como mais valia, em termos de segurança de utilização dos interferómetros [80,81,82]. No capítulo 3 este tema será abordado com detalhe.

Como comentário final pode dizer-se que a introdução das técnicas de Interferometria de *Speckle* no tecido industrial, em crescimento nas últimas décadas, se deve em grande parte ao progresso registado nos domínios do tratamento informático das imagens interferométricas. A informática tornou-se suficientemente rápida e poderosa para analisar um interferograma em tempo quasi-real e apresentar o resultado de uma forma directamente compreensível pelos utilizadores, sem que estes tenham a necessidade de serem especialista em holografia. Parafraseando um dos percursores das técnicas de interferometria holográfica, o prof. Paul Smigielski, “*A utilização da holografia em aplicações industriais necessita, em geral, mais de pessoas conhecedoras de mecânica, electrónica ou informática, do que propriamente de conhecedores de óptica!*”.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Hecht, “Óptica”, *Fundação Calouste Gulbenkian*, 1991.
- [2] T. Young, “On the theory of light and colours”, *Philos. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 91, Part 1, 1802.
- [3] A. Fresnel, “Œuvre complètes d' Augustin Fresnel”, *publicadas por Henri de Senarmon, Émile Verdet e Léonor Fresnel*, Paris, 1866.
- [4] A. Yariv, “Quantum electronics”, *John Wiley & Sons*, 1979.
- [5] T.H. Mainman, “Stimulated optical radiation in Ruby”, *Nature*, Vol. 187, pág. 493-494, 1960.
- [6] D. Gabor, “A new microscopic principle”, *Nature*, Vol. 161, pág. 777-778, 1948.
- [7] D. Gabor, “Microscopy by reconstructed wave-fronts”, *Proc. Roy. Soc.* A197, 454, 1949.
- [8] E. N. Leith and J. Upatnieks, “Reconstructed wave-fronts and communication theory”, *Journal of the Opt. Soc. of America*, Vol. 52, pág. 1123-1130, 1962.
- [9] E.N. Leith and J. Upatnieks, “Wave-front reconstruction with continuous-tone objects”, *Journal of the Opt. Soc. of America*, Vol. 53, pág. 1377-1381, 1963.
- [10] E.N. Leith and J. Upatnieks, “Wave-front reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects”, *Journal of the Opt. Soc. of America*, Vol. 54, pág. 1295-1301, 1964.
- [11] R.L. Powell and K.A. Stetson, “Interferometric vibration analysis by wave-front reconstruction”, *Journal of the Opt. Soc. of America*, Vol. 55, pág. 1593-1598, 1965.
- [12] K.A. Stetson and R.L. Powell, “Interferometric hologram evaluation and real-time vibration analysis of diffuse objects”, *Journal of the Opt. Soc. of America*, Vol. 55, pág. 1694-1695, 1965.
- [13] K.A. Haines and B.P. Hildebrand, “Surface-deformation measurement using the wave-front reconstruction technique”, *Applied Optics*, Vol.5, pág. 595-602, 1966.
- [14] P. Boone, and R. Verbiest, “Application of hologram interferometry to plate deformation and translation measurements”, *Optica Acta*, Vol. 16, pág. 555-567, 1969.
- [15] J.N. Butters, “Application of Holography to Instrument Diaphragm Deformation and Associated Topics”, *The Engineering Uses of Holography*, Cambridge University Press, London, New York, 1970.
- [16] R. Aprahamian, D.A. Evensen, J.S. Mixson and J.E. Wright, “Application of pulsed holographic interferometry to the measurement of propagating transverse waves in beams”, *Experimental Mechanics*, pág. 309-314, July 1971.
- [17] J. M Burch, “Holographic Measurement of Displacement and Strain”, *J. Strain Analysis*, Vol. 9, pág. 1-3, 1974.
- [18] R. Dändliker, B. Eliasson, B. Ineichen and F.M. Mottier, “Quantitative Determination of Bending and Torsion Through Holographic Interferometry”, *Proc. Of the Engineering Uses of Coherent Optics*, Strathclyde, Glasgow, pág. 99-122, 8- 11 April 1975.
- [19] J.N. Butters and J.A. Leendertz, “Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology”, *Optics and Lasers Technology*, pág. 26-30, 1971.
- [20] A. Macovsky, S.D. Ramsey and L.F. Schaefer, “Time-Lapse Interferometry and Contouring Using Television Systems”, *Applied Optics*, Vol.10, pág. 2722-2727, 1971.
- [21] O. Schwomma, “Holographisch-Interferometrisches oder moirémetrisches Verfahren”, *Patente de invenção 298 830*, Austria, 1972.

- [22] O. J. Løkberg, J.T. Malmo and A. Strand, “TV-Holography - a Tool for Vibration Measurements”, *Noise & Vibration Control Worldwide*, pág. 286-289, Out. 1987.
- [23] K. A. Stetson and W.R. Brohinsky, “Electro-Optic Holography and its Application to Hologram Interferometry”, *Applied Optics*, vol.24, pág. 3631-3637, 1985.
- [24] K. Creath and G. Å Slettemoen, “Vibration-Observation Techniques for Digital Speckle-Pattern Interferometry”, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 2, 1985.
- [25] A.L.V.S. Lage, “*Técnicas Ópticas na Análise de Fenómenos Dinâmicos*”, *Tese de Doutoramento, Faculdade de Eng^a. da Universidade do Porto*, 1987.
- [26] J.A. Leendertz & J.N. Butters, “An image-shearing Speckle Pattern Interferometric Technique for measuring bending moments”, *J. Physics E: Scien. Instr.* Vol. 6, pág. 1107-1110, 1973.
- [27] H.M. Pederson, O.J. Løkberg and B.M. Førre, “Holographic Vibration Measurement Using a TV Speckle Interferometer with Silicon Target Vidicon”, *Optics Communications*, Vol.12, pág. 421-426, 1974.
- [28] K. Biedermann, L. Ek and L. Østlund, “A TV Speckle Interferometer”, in *The Engineering Uses of Coherent Optics*, (E. R. Robertson Ed.), pág. 219-221, Cambridge Univ. Press, London and New York, 1976.
- [29] S. Nakadate, T. Yatagai and H. Saito, “Electronic Speckle Pattern Interferometry Using Digital Image Processing Techniques”, *Applied Optics*, Vol. 19, pág. 1879-1883, 1980.
- [30] O.D.D. Soares and A.L.V.S. Lage, “Use of a TV-Frame Memory on Electronic Speckle Pattern Interferometry Applied to Orthopedics”, *Proc. SPIE, 15th International Conference*, Ago. 1982.
- [31] P. Smigielski, “Holographie industrielle”, *Ed. Teknea*, 1994.
- [32] K.-E. Fallstrom, K. Olofsson, H.O Saldner and S. Schedin, “Dynamic material parameters in as anisotropic plate estimated by phase-stepped holographic interferometry”, *Optics and Lasers in Enginnering*, Vol 24, pag. 429-454, 1996.
- [33] R. Hofling, “Combined theoretical and experimental methods in material mechanics”, *3rd International Workshop Fringe’97*, Bremen Germany, 15-17 September 1997.
- [34] A.A. Dyrseth and S. Skatter, “Vibration analysis of logs with electronic speckle pattern interferometry”, *Applied Optics*, Vol. 36, pág. 3649-3656, 1997.
- [35] S. Urgela, “Grading of wooden plates for musical instrument making by means of holographic interferometry”, *Optical Enginnering*, Vol. 37, pag. 2108-2118, July 1998.
- [36] R. Pezzoni and R. Krupka, “Laser shearography for nondestructive testing of large area composite helicopter structures”, *15th WCNDT*, Roma, Italia, 2000.
- [37] G.M. Chapman and X. Wang, “Interpretation of experimental and theoretical data for prediction of mode shapes of vibrating turbocharger blades”, *Journal of Vibration, Acoustics, Stress and reliability in Design*, Vol. 110, pag.53-58, January 1988.
- [38] P.W. Fry, “Silicon Photodiode Arrays”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 8,pág.337-349, 1975.
- [39] G. Pedrini, P. Froning, H. Fessler and H. Tiziani, “Transient vibration measurement by using multi-pulse digital holography”, *Optics & Laser Technology*, Vol. 29, Pag. 505-511, 1997.
- [40] F. Santos, M.Vaz, “ Shearography with pulsed lasers”, *IRF’99*, Porto, Portugal, 19-22 Julho 1999.
- [41] Pulsed Digital Holography and Shearography, - *PDHS Report* 1997
- [42] J.Hecht, *Understanding lasers, an entry level guide*, IEEE Press, 1993.
- [43] J.Salcedo, *Lasers*, INESC-N, 1992.

- [44] “INCA”, 6th Framework RTD project, 6 month report, March 2001.
- [45] R. Spooren, “Pulsed video speckle interferometry”, Tese de Doutorado, NTH Univ. Trondheim, 1992
- [46] Y.Y. Hung, “Apparatus and method for electronic analysis of test objects”, United States **Patent** #4,887,899, 19 December 1989.
- [47] M.A.P. Vaz, “Interferometria Laser e Métodos Híbridos em Mecânica Experimental”, *Tese de Doutorado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.
- [48] A. Ennos, “Measurement of in-plane surface strain by hologram interferometry”, *J. Physics E. Sci. Instr.*, Vol. 1, pag. 731-734, 1968.
- [49] O. Lockberg & G. Slettemoen, “Basic electronic speckle pattern interferometry”, *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol.10, Academic Press, 1987.
- [50] Y. Hung, R. Rowlands and I. Daniel, “Speckle-shearing interferometric technique: a full-field strain gauge”, *Applied Optics*, Vol. 14, pag 618-622, 1975.
- [51] J. Monteiro, M. Vaz; F.Q. Melo; J. Silva Gomes, “Use of Interferometric techniques for measuring the displacement field in the plane of a part-through crack existing in a plane”, *Int. Journ. Of Pressure Vessels and Piping*, 78, pag. 253-259, 2001.
- [52] F. Santos, M. Vaz, et al ; “Medição de Deslocamentos no Plano de uma Estrutura Compósita Reticular para o LHC (CERN)”, 3º Encontro Nacional da Análise Experimental de Tensões e Mecânica Experimental, Porto, 24-26 de Março de 1999.
- [53] J: Tyrer, “Optical interferometry analyzes the body”, *Laser Focus World*, April 2001.
- [54] J.A. Simões, J. Monteiro, J. Chousal, M. Vaz and M. Taylor, “Strain patterns adjacent to bonded and debonded bone-implant interfaces: A holographic study of an idealised proximal femur”, *European Society Biomechanics*, Dublin, Ireland, 27-30 August, 2000.
- [55] J. Takezaki & H. Hung, “Direct measurement of flexural strain in plates by shearography”, *J. of Applied Mechanics*, Vol. 53, pag. 125-129, 1986.
- [56] R. Hathaway, J. Hovanesian and Y. Hung, “Residual stress evaluation using shearography with large shear displacements”, *Moiré techniques, Holographic Interferometry, Optical NDT and applications to Fluid Mechanics (SPIE)*, Vol. 1554B, pag. 725-735, 1991.
- [57] Y. Hung & C. Taylor, “ A tool for measurement of derivatives of surface displacement”, *Proceedings of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, Vol. 41, pag. 169-175, 1973
- [58] R. Sirohi, “Speckle Shear Interferometry – A review”, *Jornal of Optics (India)*, Vol. 13, pag. 95-113, 1984.
- [59] EUCLID – CEPA3 RTP3.1 WP2000 Damage detection methods, 1996.
- [60] K.-E. Fallstrom, “Material parameters and defects in anisotropic plates determined by holographic interferometry”, *Tese de Doutorado*, Lulea University of Technology, Sweden, 1990.
- [61] N. Rilo; N. Peixinho; M. Vaz; R. Leal e J. Cirne; “Avaliação Experimental da Rigidez ao Corte no Plano de Placas Compositas Laminadas Usando ESPI”; 4º Encontro Nacional de Análise Experimental de Tensões e Mecânica Experimental, IPB, Bragança, 17 a 19 de Outubro de 2001.
- [62] M. Vaz, F.Q. Melo, J.F. Rodrigues and J. F. Gomes, “Noise and Vibration Analysis of an Automobile Engine Component”; *Machine Vibration*, 5, pp.63-70, Springer-Verlag, London, 1996.
- [63] M. Georges and P. C. Lemaire, “Real-time stroboscopic holographic interferometry using sillenite crystals for the quantitative analysis of vibrations”, *Optics Communications*, Vol, 145, pag. 249-257, January 1998.

- [64] O.J. Løkberg and K. Høgmoen, “Use of Modulated Reference Wave in Electronic Speckle Pattern Interferometry”, *Journal of Physics E*, 9, pág. 847- 851, 1976.
- [65] G. Pedrini and H.J. Tiziani, “Double-pulse electronic speckle interferometry for vibration analysis”, *Applied Optics*, Vol, 33, pag. 7857-7863, December 1994.
- [66] G. Pedrini, B. Pfister and H.J. Tiziani, “Double-pulsed-electronic speckle interferometry”, *Journal of Modern Optics*, Vol. 40, pag. 89-96, 1993.
- [67] H. Steinbichler and S. Leidenbach, “Electronic speckle interferometry with pulsed lasers and practical
- [68] W. Gottemberg, “Some applications of holographic interferometry”, *Experimental mechanics*, pag. 405-410, September 1968.
- [69] B. Barrientos, A.J. Moore, C. Pérez-López, L.L. Wang and T. Tschudi, “Transient deformation measurement with ESPI using a diffractive optical element for spatial phase-stepping”, *3rd International Workshop Fringe’97*, Bremen Germany, 15-17 September 1997.
- [70] J.N. Petzing and J.R. Tyrer, “In-plane pulsed carrier speckle interferometry for structural surface intensity measurement”, *Journal of Modern Optics*, Vol. 46, pag. 1947-1959, 1999.
- [71] J.P. Chambard, V. Chalvidan, X. Carniel & J.C. Pascal, “Pulsed TV-Holography recording for vibration analysis applications”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 38, pag. 131-143, 2002.
- [72] Vibration Intensity Processing by Full-field Laser Multipulse Technique - *VIP Report 2000*
- [73] Y-L Zou, G. Pedrini, H. Tiziani, “Two-wavelength contouring with a pulsed ruby laser by employing TV-holography”, *Journal of Modern Optics*, Vol. 43, pag. 639-646, 1996.
- [74] J. Chouzal, “Técnicas de processamento de imagens obtidas por métodos ópticos em análise experimental de tensões”, *Tese de doutoramento em Engenharia Mecânica*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
- [75] F. Santos e N Fournier, “La shearographie en maintenance aéronautique”, *Congresso da Sociedade Francesa de Óptica*, Saint-Aubin de Médoc, 18-22 de Novembro, 2002.
- [76] D. Albrecht, “Electronic speckle pattern interferometry: Instruments development, optimisation and applications”, EU Joint Research Centre, Special publication n° I.99.40, February 1999, Ispra, Italy.
- [77] K. Creath, "Phase-Measurements Interferometry Techniques", in *Progress in Optics*, vol. XXVI, Ed. E. Wolf (Elsevier Science Publishers) , Amsterdam, pág. 351-393, 1988.
- [78] M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, “Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry”, *Journal Opt. Soc. Am.*, Vol. 72, pag. 156-160, January 1982.
- [79] T.M. Kreis & W.P.O. Juptner, “Fourier-Transform evaluation of interference patterns: the role of filtering in the spatial frequency domain”, *Laser interferometry: Quantitative Analysis of Interferograms*, SPIE Vol. 1162, pag. 116-125, 1989.
- [80] A. Leite, “Optical fibre illumination for holography”, *Optics Communications*, Vol. 28, pag. 303-308, 1979.
- [82] S. Schedin, G. Pedrini, H.J. Tiziani and F.M. Santoyo, “All-fibre pulsed digital Holography”, *Optics Communications*, Vol, 165, pag. 183-188, July 1999.
- [83] J.D.R. Valera, J.D.C. Jones, D.P. Towers & C.H. Buckberry, “Strain and vibration analysis by fibre based speckle shearing interferometry”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 26, pag. 361-376, 1997.

CAPÍTULO 2

LASERS E INTERFEROMETRIA DE SPECKLE

2.1 - Lasers	2.2
2.1.1 – Princípios básicos de funcionamento	2.3
2.1.2 – Componentes <i>laser</i> e propriedades da cavidade ressonante	2.7
2.1.3 – Características da emissão <i>laser</i>	2.12
2.1.4 – Fenómenos dinâmicos e não-lineares	2.16
2.1.5 – <i>Speckle</i>	2.21
2.2 – Fundamentos da Interferometria de <i>Speckle</i>	2.27
2.2.1 – Holografia	2.28
2.2.2 - Interferometria holográfica	2.30
2.2.3 - Interferometria de <i>Speckle</i>	2.32
Referências	2.45

O objectivo deste capítulo é a apresentação, de forma sucinta, dos princípios físicos fundamentais associados à acção laser. São descritas as principais características da radiação emitida ou amplificada por estes dispositivos, em particular os que foram utilizados neste trabalho. Neste capítulo são ainda discutidas as propriedades dos padrões de speckle. Esta apresentação lançará as bases para a compreensão dos sistemas de registo de padrões de interferometria de speckle.

As diferentes técnicas de registo de padrões de speckle existentes são discutidas, destacando-se aquelas que tiveram influência sobre as configurações interferométricas utilizadas. As vantagens e desvantagens de cada uma delas serão expostas. Os diferentes pontos focados são ilustrados com imagens exemplificativas obtidas pelo autor.

2.1 - LASERS

A palavra *LASER* é um acrónimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Por isso, *Lasers* são dispositivos que emitem, ou amplificam, radiação electromagnética coerente em frequências que se estendem desde o infravermelho longínquo até ao ultravioleta de vácuo, incluindo o espectro visível, ver figura 2.1. No horizonte situa-se uma gama de frequências ainda mais alargada, incluindo nomeadamente os raios-X. A toda esta gama de frequências é, por vezes, associado o termo *luz*.

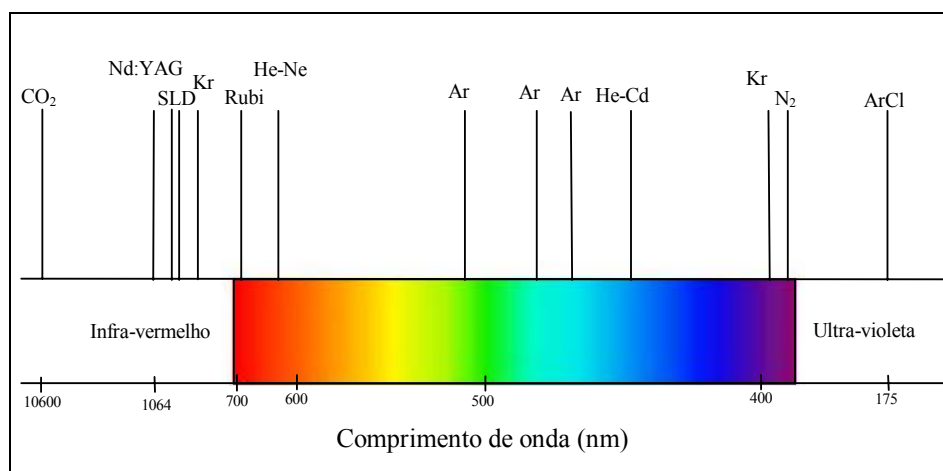


Figura 2.1 – Exemplos de linhas de emissão *laser*.

Foi Einstein quem primeiro previu a emissão de radiação baseada no fenómeno da emissão estimulada, estava-se então no ano de 1917 [1]. Apesar desta previsão teórica, datada do início do século só em 1960 foi

apresentado um dispositivo experimental capaz de realizar o fenómeno. Com efeito, Mainman apresentou no início da década de 60 o primeiro dispositivo capaz de emitir radiação visível através do fenómeno da emissão estimulada, utilizando para isso um cristal de Rubi como meio activo [2]. Deve referir-se que o mecanismo de emissão estimulada, subjacente à emissão e amplificação de radiação coerente, foi inicialmente realizado nas frequências mais baixas do espectro de radiação electromagnética, designadas por micro-ondas. Aí, de forma natural, surgiu o termo *MASER*, um acrónimo para *microwave amplification by stimulated emission of radiation*. (amplificação de micro-ondas por emissão estimulada de radiação) [3]. Quando algum tempo mais tarde, o princípio se estendeu às frequências visíveis, ou à *luz*, o termo *LASER* teve o seu nascimento.

Actualmente existem *lasers* com formas físicas variadas em que os materiais utilizados, os esquemas de funcionamento, bem como a engenharia de implementação prática, podem diferir grandemente de um tipo específico de *laser* para outro. O princípio básico de funcionamento, no entanto, mantém-se inalterado.

2.1.1 – PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO

Interacção radiação/matéria

Os sistemas atómicos (átomos, iões ou moléculas) podem existir apenas em níveis de energia discretos, ou seja, a sua energia interna apenas pode assumir certos valores determinados segundo regras físicas precisas. Esta discretização, ou quantificação, de energia está intimamente ligada à dualidade onda-partícula existente na natureza.

Considerando interacções entre átomos, poderão ocorrer alterações, quer da sua energia cinética, quer da sua energia interna. Atendendo a que esta última apenas pode assumir valores discretos, as variações de energia interna também serão discretas. Estas variações poderão ser positivas ou negativas, consoante o átomo absorve ou cede energia na interacção. Mesmo na ausência de outros átomos, a energia interna de um átomo poderá ser alterada no tempo por interacção com um campo electromagnético. Este campo poderá ter origem externa ao átomo ou pode, até, ser criado pelo próprio átomo. Neste caso, as variações de energia interna estão associadas, ou à emissão, ou à absorção de partículas de luz (fotões). Estas trocas são possíveis através de transições entre diferentes níveis de energia de um átomo.

Sendo a radiação electromagnética caracterizada pela sua frequência, ou comprimento de onda, a energia de cada fotão emitido ou absorvido é dado pela Lei de Planck:

$$E_2 - E_1 = h \nu_{21} \quad (2.1)$$

E_2 e E_1 são dois níveis discretos de energia, ν_{12} é a frequência da radiação e h é a constante de Planck ($h=6.6\text{e}^{-34}$ Js).

Um electrão pode absorver energia através de diversas formas. Do ponto de vista da acção *laser*, dois métodos de fornecimento de energia aos electrões são importantes:

- Irradiando-o com uma onda electromagnética, com a frequência apropriada, é possível a transferência de toda a energia de um fotão directamente para um electrão orbital.
- Com uma descarga eléctrica, a energia é fornecida por colisão com electrões que foram acelerados pelo campo eléctrico.

O resultado de qualquer um destes dois métodos é a colocação, através da absorção de energia, de um electrão num nível de energia mais elevado do que aquele onde se encontrava.

A natureza impõe que todas as suas estruturas atómicas e moleculares se encontrem no estado mais baixo de energia possível. Assim, um electrão excitado num nível mais elevado tentará, logo que possível, decair para o seu estado inicial através da emissão de um fotão. Este processo de emissão pode ocorrer de duas formas distintas:

- i) *Emissão espontânea* – O fotão é emitido pelo átomo, através de um processo de relaxação (não é provocada externamente) com uma energia igual à diferença de energia entre os dois níveis da transição e desce para um estado de menor energia de uma forma completamente aleatória.
- ii) *Emissão estimulada* - neste processo o electrão é induzido a descer para um nível de energia mais baixo pela presença de um fotão de energia $E_2 - E_1$, igual à diferença de energia entre os dois níveis.

Pode então dizer-se que uma onda electromagnética cuja frequência ν_{12} corresponde a uma diferença de energia entre dois níveis de um sistema atómico pode interagir com ele. Este processo de emissão estimulada não tem nada de extraordinário, pois o electrão mais cedo ou mais tarde voltaria espontaneamente ao estado de menor energia: a transição é apenas antecipada pela presença do fotão estimulador. O tratamento através da mecânica quântica da interacção entre a radiação e a matéria mostra que a emissão estimulada é completamente indiscernível do campo de radiação que lhe dá origem. Esta situação é justificada através da estatística de Bose-Einstein para a qual a luz é um gás constituído por fotões [4]. Este gás de fotões é no entanto especial, porque as partículas constituintes não obedecem às leis estatísticas convencionais. Exemplificando, na estatística semi-clássica duas partículas distintas podem ocupar três estados de nove maneiras diferentes. Isto é, existem três hipóteses, em nove, de encontrar partículas no mesmo estado, ver figura 2.2.

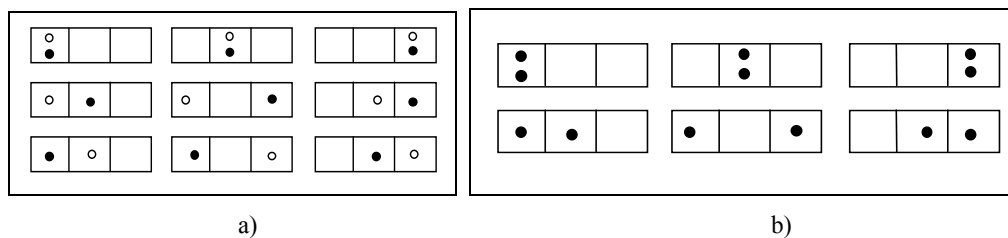


Figura 2.2 – a) Estatística semi-clássica: níveis energéticos ocupados por duas partículas.

b) Estatística de Bose-Einstein : níveis energéticos ocupados por dois fotões

A estatística de Bose-Einstein considera que se as duas partículas forem indiscerníveis, como é o caso dos fótons, haverá menos estados disponíveis (menos três). Este facto faz com que a probabilidade de obter fótons no mesmo estado aumente, ver figura 2.2 b). Pode então dizer-se que existe uma tendência estatística, e não mais do que isso, que faz com que os fótons prefiram estar juntos.

Numa situação em que existe um conjunto de átomos excitados e prontos a emitir um fóton num instante e direcção aleatórios, se um fóton com a frequência adequada passar por este conjunto de átomos, estes são estimulados pela sua presença e aumenta a probabilidade de emitirem os seus fótons mais cedo do que o previsto [4]. Para além disso, os fótons são emitidos na mesma direcção e frequência do fóton estimulador. Isto quer dizer que a radiação estimulada tem as mesmas propriedades direccionais, polarização e fase, além das mesmas características espectrais, da emissão incidente. Estes factos são responsáveis pelo elevado grau de coerência que caracteriza a emissão *laser*. Na figura 2.3 representam-se os três tipos de transições energéticas que podem ocorrer: a absorção estimulada, a emissão espontânea e a emissão estimulada (ou induzida).

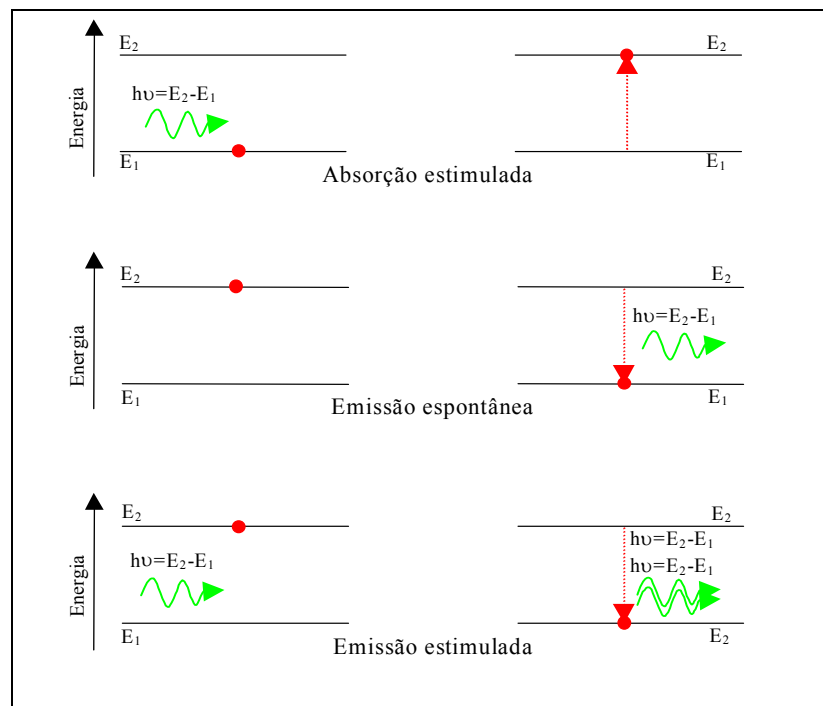


Figura 2.3 – Diagrama energético das transições.

Inversão de população

Neste parágrafo vamos considerar um material como um vasto conjunto de sistemas atômicos idênticos. Em equilíbrio térmico, os níveis energéticos mais baixos são mais fortemente populados que os níveis mais elevados (distribuição de Boltzmann). Uma onda electromagnética interagindo com o material elevará os átomos, iões ou moléculas, de um nível energético mais baixo para um mais elevado através da absorção de radiação.

Para existir emissão *laser* é necessário que o equilíbrio energético das partículas de um material seja alterado de forma a permitir armazenar energia nos átomos, iões ou moléculas, deste material. Isto pode ser conseguido através de uma fonte de bombeamento externa que transfere os átomos de um estado energético mais baixo para um mais elevado. A radiação de bombeamento causa então uma “inversão de população” no sistema atómico. Este facto é representado na figura 2.4 onde se apresenta uma distribuição genérica de átomos pelos seus possíveis níveis energéticos, primeiro em equilíbrio térmico e depois, após inversão de população. Aqui, entre os níveis 2 e 3 foi criada uma “inversão de população”.

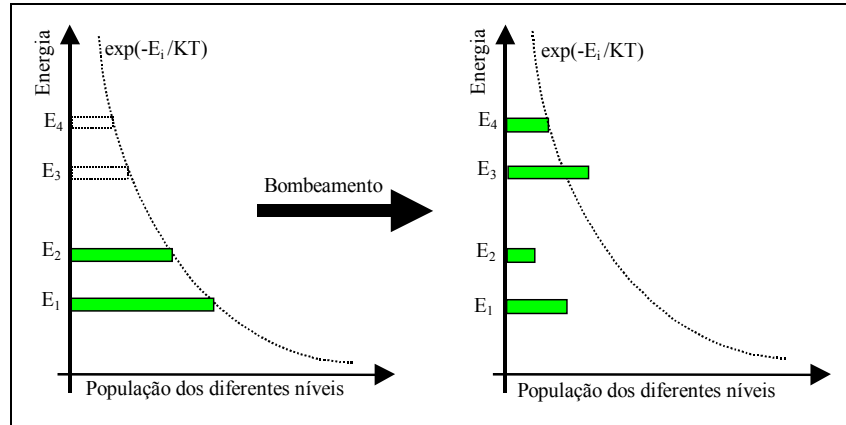


Figura 2.4 – Populações de um sistema atómico de quatro níveis : a) em equilíbrio térmico (distribuição de Boltzmann) e b) após “inversão de população”.

Uma onda electromagnética com uma frequência apropriada – $\nu = (E_2 - E_1)/h$ –, incidente na população *laser* “invertida”, será amplificada pois os fotões incidentes provocam a descida de nível dos átomos do estado mais elevado para o mais baixo e a consequente emissão de fotões. Como resultado, energia é extraída do sistema atómico e fornecida ao campo de radiação incidente. A libertação da energia armazenada por interacção com uma onda electromagnética é baseada na emissão estimulada ou induzida.

Conjugando todos os processos de alteração da energia interna dos átomos (absorção, emissão espontânea e emissão estimulada) e considerando apenas dois níveis quânticos podemos escrever a seguinte equação para descrever a evolução temporal do número de fotões $n(t)$;

$$\frac{dn}{dt} = -K \cdot [N_1(t) - N_2(t)] \cdot n(t) \quad (2.2)$$

sendo N o número de átomos que se encontra num determinado nível energético N_1 ou N_2 [5]. Desta equação pode concluir-se que existirá crescimento do número de fotões se, por qualquer mecanismo, se conseguir assegurar que a população instantânea do nível energético superior é maior que a do nível inferior.

Os métodos para alcançar uma inversão de população baseiam-se na bombeamento de sistemas atómicos de 3 ou 4 níveis, pois os sistemas atómicos de 2 níveis só podem atingir, no máximo, uma igualdade de população entre os níveis de transição *laser* [6].

O sistema de três níveis proposto inicialmente por Bloembergen [7] está ilustrado na figura 2.5. A ocupação dos níveis energéticos de uma população de átomos em equilíbrio térmico obedece à distribuição de Boltzmann. Se o conjunto de átomos no nível E_0 for intensamente iluminado os electrões podem ser excitados e o bombeamento de átomos para o nível E_2 pode ser conseguido. A transição dos electrões para o nível E_1 pode ocorrer através de processos não radiativos. Esta transição não radiativa deve ser efectuada rapidamente para, eventualmente, se poder criar uma inversão de população entre o nível E_1 e o nível E_0 . Este tipo de bombeamento *laser* necessita de potências elevadas, uma vez que a transição *laser* se faz com o nível fundamental E_0 . Para além disso, este sistema não permite uma emissão *laser* contínua.

O *laser* de quatro níveis, apresentado também na figura 2.5, necessita de níveis de bombagem muito inferiores aos dos sistemas de três níveis. Se $E_1 - E_0$ for suficientemente elevado comparado com kT (a energia térmica no estado fundamental) então as populações dos níveis E_1 , E_2 e E_3 são todas muito menores em condições de equilíbrio térmico. Assim, se os átomos forem bombeados do nível E_0 para o nível E_3 , do qual eles decaem muito rapidamente para o nível meta-estável E_2 , uma inversão de população é rapidamente criada entre E_2 e E_1 .

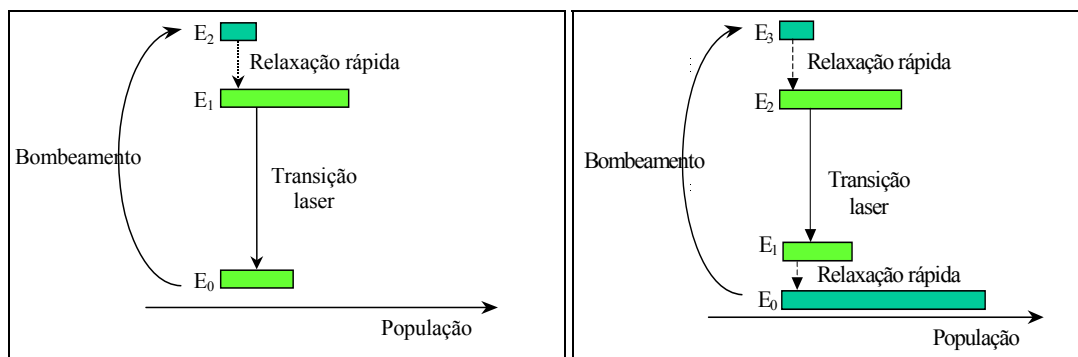


Figura 2.5 – Sistemas atômicos de 3 e 4 níveis com transição laser.

Se os tempos de vida das transições $E_3 \rightarrow E_2$ e $E_1 \rightarrow E_0$ forem curtos, a inversão de população entre E_2 e E_1 pode ser mantida com níveis de bombagem moderados e de forma contínua. Embora os esquemas de funcionamento dos *lasers* tenham frequentemente formas bastante complexas, podem geralmente ser aproximados a estes dois tipos de esquemas, 3 e 4 níveis [7].

2.1.2 - COMPONENTES LASER E PROPRIEDADES DA CAVIDADE RESSONANTE

Para a obtenção de um *laser* como oscilador ou fonte de radiação coerente deve assegurar-se o reforço progressivo do campo amplificado por sucessivas passagens num meio activo. Para isso coloca-se o meio activo entre dois espelhos, criando uma cavidade óptica. A figura 2.6 representa, de uma forma genérica, os

elementos essenciais de um *laser*, quer na configuração de oscilador, quer na configuração de fonte de radiação coerente.

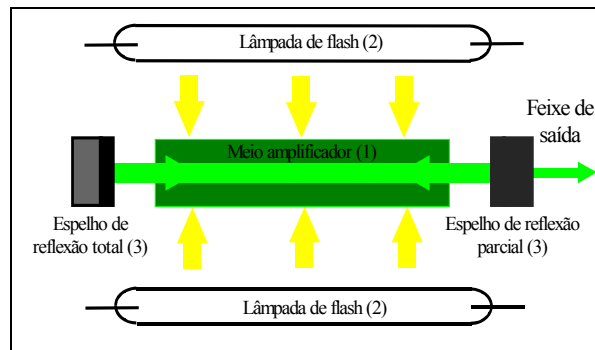


Figura 2.6 – Diagrama esquemático dos componentes de base de um sistema *LASER*.

São três os elementos fundamentais de um laser:

(1) Um meio ou material laser, que é um conjunto de átomos, moléculas ou iões (podendo assumir formas diversas desde sólido, líquido, gasoso ou até um cristal semiconductor) apropriadamente preparado para garantir acção *laser*, isto é, amplificar a luz que passa por ele. Todos eles devem possuir um estado meta-estável onde os átomos possam ser armazenados após receberem energia do sistema de bombagem e desta forma inverterem a população em relação a um nível inferior. Por simplicidade utilizaremos o termo átomo para representar qualquer tipo de constituinte do meio *laser*.

- Os *lasers* de estado-sólido utilizam um material activo distribuído numa matriz sólida. Um exemplo é o *laser* de Rubi em que o material activo é um cristal de óxido de alumínio, Al_2O_3 , com alguns átomos de alumínio substituídos por átomos de crómio na rede cristalina. Actualmente o *laser* de estado-sólido mais comum é o de Nd:YAG (granada de ítrio e alumínio numa matriz de Neodímio– *Neodimium: Ytrium Aluminium Garnet*). Estes *lasers* permitem produzir feixes com potências de saída muito elevadas, da ordem dos TW's.
- Os *lasers* de gás utilizam um gás ou uma mistura de gases encerrados num tubo. Estes podem ainda ser divididos em *lasers* atómicos, quando a transição se efectua entre níveis electrónicos de átomos (*laser* de Hélio-Neon), iónicos (*laser* de Árgon) ou moleculares (*laser* de CO_2). As suas emissões podem variar do infravermelho longínquo até ao ultravioleta (1 mm até 150 nm) e a sua potência de saída varia entre os mW (*lasers* de He-Ne) e os KW's (*lasers* de CO_2).
- Os *lasers* de corante utilizam um meio activo que é geralmente um corante orgânico complexo em solução líquida ou em suspensão. O mais comum destes *lasers* é o de Rodamina 6G que permite uma sintonia de cerca de 200 nm na zona do vermelho (620 nm). Actualmente existem tantos corantes orgânicos que parece possível construir um laser em qualquer frequência da zona visível do espectro.

- Os *lasers* semicondutores, ou díodos *laser*, não devem ser confundidos com os *lasers* de estado-sólido. Os *lasers* semicondutores consistem em duas camadas de material semicondutor sobrepostas. Estes *lasers* são geralmente de reduzidas dimensões e possuem potências de saída inferiores a 200 mW. Estes *lasers*, amplamente utilizados em telecomunicações, são fabricados através das mesmas tecnologias dos semicondutores clássicos. Assim, o seu preço é reduzido quando comparado com os outros tipos de *lasers*. Podem ser construídos em forma de matriz e utilizados no bombeamento de outros sistemas *laser*. O mais comum dentro desta categoria é o *laser* de Arseniato de Gálio.

(2) Um processo de excitação ou bombeamento que permite fornecer energia aos átomos, iões ou moléculas do meio activo e elevá-los para um nível energético superior, metaestável, de forma a criar uma *inversão de população*. O processo de excitação pode ser realizado através da interacção mecânica entre os átomos ou por incidência de energia electromagnética, com a frequência adequada ao meio *laser*. Quando o meio activo é um sólido o bombeamento é geralmente conseguido por irradiação de luz branca. Esta luz, absorvida pelos átomos no interior do meio activo, provoca a passagem destes para níveis mais energéticos. Esta última década assistiu ao nascimento de sistemas de bombeamento que utilizam como fonte de luz outros *lasers*. Geralmente estes sistemas utilizam díodos *laser* de bombeamento e são mais económicos, compactos, de manutenção mais fácil e com maiores tempos de vida. Os meios gasosos são obrigatoriamente contidos em recipientes selados, sob a forma de tubos, e são geralmente bombeados através de descargas eléctricas que provocam o choque entre átomos e a consequente absorção de energia. Nos *lasers* de corante o bombeamento é feito opticamente ou através de reacções químicas e funcionam geralmente em regime pulsado. No que diz respeito aos díodos *laser*, estes são normalmente bombeados através da passagem de corrente na junção PN invertida, onde os substratos são postos em contacto.

(3) Uma cavidade óptica que é um conjunto de elementos ópticos apropriados, como espelhos ou lentes, que permite que um feixe de radiação passe uma vez pelo meio (ou um número reduzido de vezes), se o *laser* operar como amplificador, ou passe um número elevado de vezes pelo mesmo meio, num esquema de realimentação óptica, se o *laser* operar como oscilador ou fonte. Os elementos ópticos dependem do meio óptico activo e do modo de operação temporal do *laser*; contínuo ou pulsado. A cavidade óptica desempenha um papel fundamental no funcionamento de um *laser*. Esta assegura duas funções independentes: por um lado, limita fisicamente um volume do espaço, ou material, no qual é possível criar e manter campos electromagnéticos de grande intensidade; por outro, actua como um filtro desses mesmos campos, permitindo que algumas frequências ou direcções de propagação sejam privilegiadas, em detrimento de outras.

Cavidade óptica ressonante

Existem dois tipos importantes de distribuição espacial de campos electromagnéticos num *laser*. Um refere-se à distribuição de energia segundo o eixo da cavidade e outro à distribuição de energia num plano transversal ao eixo da cavidade.

Para o primeiro caso a distribuição espacial do campo electromagnético ao longo do eixo da cavidade, designada por axial, é imposta pela condição de oscilação *laser*: *apenas as frequências capazes de criarem um padrão estacionário podem oscilar e ser amplificadas ao atravessarem o meio activo.*

Para que a distribuição de fase não varie no tempo é necessário que após um fóton percorrer por completo a cavidade (percurso A-B, figura 2.7), a sua diferença de fase seja um múltiplo inteiro de 2π . Esta condição de onda estacionária pode ser descrita através da equação seguinte [3]:

$$m = \frac{L}{\lambda/2} \quad \text{e} \quad \nu_m = \frac{m \nu}{2 L}, \quad (2.3)$$

em que m é um inteiro, L é o caminho óptico entre os espelhos e λ o comprimento de onda da transição electromagnética. Cada valor de m que satisfaz esta condição define um *modo axial* (ou *longitudinal*) da cavidade, agora designada ressonante. Existe assim, um número infinito de modos de oscilação longitudinais, cada um com a sua frequência própria, ν_m . São estes os únicos modos estáveis (e possíveis) no interior da cavidade.

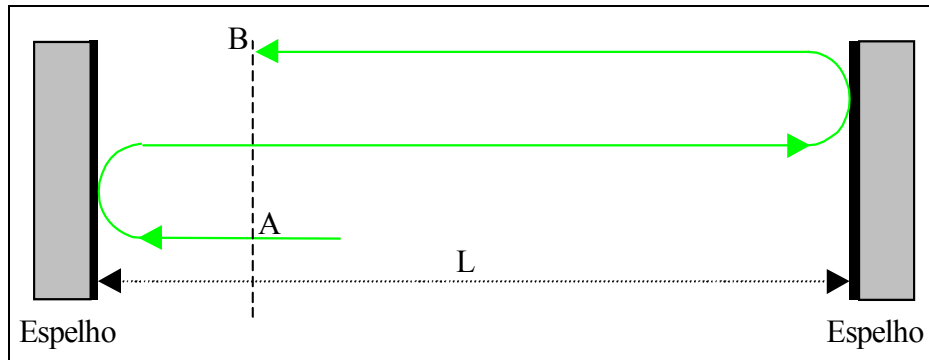


Figura 2.7 – Diagrama esquemático de um percurso óptico numa cavidade ressonante.

Uma vez que a largura dos modos de ressonância de uma cavidade é consideravelmente inferior à largura das riscas associadas às transições atómicas espontâneas, então, da gama de frequências disponíveis, associadas à transição electrónica, a cavidade selecciona e amplifica unicamente algumas riscas estreitas, e por vezes apenas uma. Estas situações são descritas na figura 2.8 em que se representa a largura de banda da transição *laser* e os diferentes modos axiais de oscilação capazes de serem amplificados (de $n-2$ a $n+2$). Só nestes casos é que as perdas na cavidade são inferiores ao ganho óptico fornecido pela transição.

Para além dos modos axiais ou longitudinais de oscilação, que correspondem a ondas estacionárias ao longo da cavidade, esta sustenta igualmente no seu interior modos transversos, isto é, configurações do campo aproximadamente perpendiculares ao eixo.

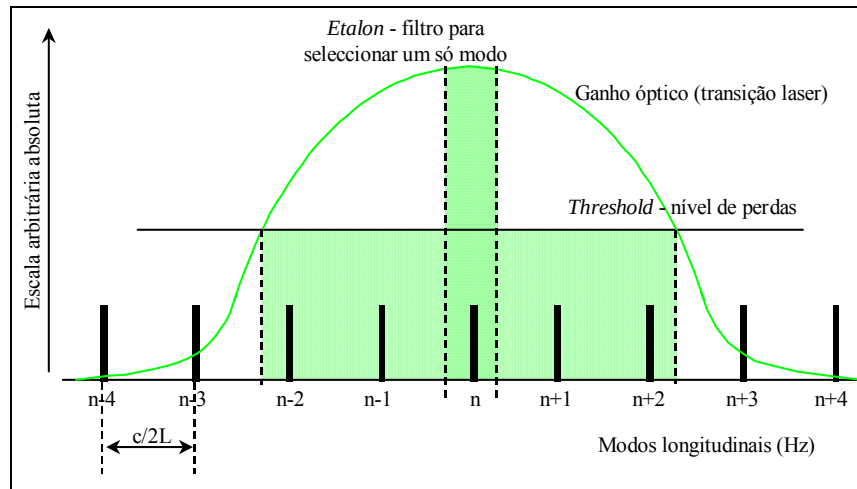


Figura 2.8 – Diagrama de perdas/ganhos dos diversos modos longitudinais de oscilação.

A distribuição transversal do campo electromagnético é imposta pela elevada simetria da cavidade e por esta ser aberta (com uma dimensão transversal finita). Assim, as reduzidas dimensões transversais dos espelhos vão impor perdas por efeito de difracção significativas [3]. Uma parte importante do campo vai ser cortada pelos bordos dos espelhos. Estas perdas por difracção vão impor que no fim de cada volta completa à cavidade, o campo tenha uma distribuição espacial diferente. Terá havido formas de propagação do campo electromagnético prejudicadas e outras favorecidas (as mais próximas do eixo da cavidade). Quando se atinge uma situação estacionária na propagação do campo electromagnético, imposta pela condição *perdas = ganhos*, estamos na presença de um modo transversal de oscilação [3].

Numa cavidade óptica existem normalmente vários modos transversais possíveis e, em geral, um *laser* oscilará simultaneamente em vários desses modos, ver figura 2.9.

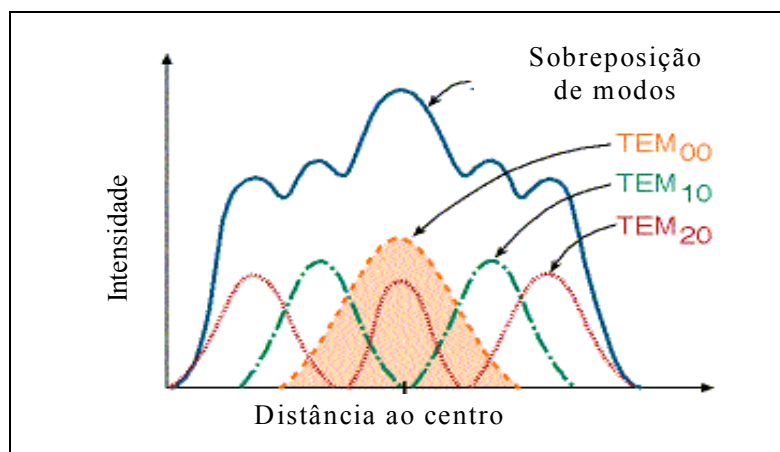


Figura 2.9 – Distribuição de intensidade dos diversos modos transversais de oscilação.

A geometria imposta pela cavidade conduz a que estes modos, em particular os de ordem inferior, possam ser descritos como sendo caracterizados por uma frente de onda essencialmente plana ou algo esférica,

dependendo da geometria específica da cavidade. Na figura 2.10 representa-se a distribuição de fase e de amplitude típica para uma onda electromagnética representativa de um feixe *laser* comum a oscilar no modo transversal fundamental, TEM_{00} [8].

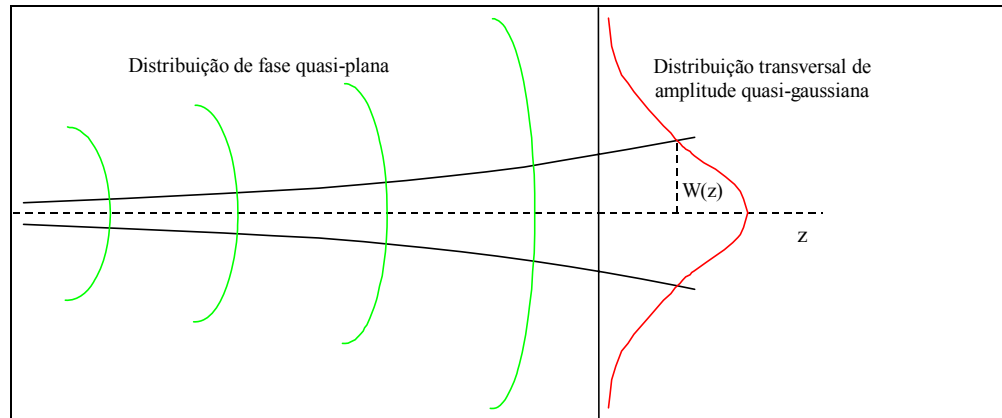


Figura 2.10 – Distribuição de fase e de amplitude de uma onda electromagnética representativa de um *laser*.

Em síntese, uma cavidade óptica impõe distribuições espaciais específicas, quer transversais, quer longitudinais. Uma cavidade óptica tem assim, modos transversais e longitudinais associados. Os primeiros condicionam a divergência do feixe *laser* emitido e os segundos limitam, em geral, a largura espectral do feixe que é possível obter.

2.1.3 – CARACTERÍSTICAS DA EMISSÃO LASER

Da descrição dos sistemas *laser* apresentada no parágrafo anterior, verificou-se que nem sempre os *lasers* emitem um feixe de elevada coerência - quase monocromático. Este facto resulta da co-existência de diversas formas de emissão de energia. Na realidade, o feixe de saída, que pode ser contínuo ou impulsional, consiste na maior parte das vezes em diferentes modos axiais ou transversais com comprimentos de onda ligeiramente diferentes. Quando se consideram as aplicações das fontes *laser* nas técnicas de Interferometria Holográfica as suas características de emissão devem ser bem analisadas de forma a verificar se podem ou não ser aceitáveis. Nestas técnicas as características de coerência e polarização da radiação são de vital importância.

Monocromaticidade e coerência

Em oposição a uma fonte de luz térmica, descrita por um espectro de frequências muito largo, a luz *laser* pode ser classificada como monocromática. No entanto esta monocromaticidade não é perfeita e variações consideráveis existem em relação à largura de banda da luz emitida. O modelo simples da transição *laser* ocorrer entre dois níveis energéticos bem definidos é muito simplista. Na verdade a transição envolve trocas de energia entre vários níveis quânticos, originando várias possibilidades de emissão de luz. Assim, a largura

da risca atômica associada à transição *laser* é, em geral, muito superior à largura de cada modo longitudinal na cavidade. Esta largura de banda da transição *laser* designa-se por *largura de fluorescência* e é geralmente medida a metade da amplitude máxima da linha de fluorescência (*FWHM – Full Width Half Maximum*), ver figura 2.11. Como se pode verificar, existe uma grande semelhança entre a curva de ganho, figura 2.8 e a curva de fluorescência, figura 2.11. A razão desta semelhança prende-se com o facto da primeira ser proporcional à largura da linha de fluorescência da emissão espontânea [5].

Mesmo quando existe apenas uma única transição *laser* ocorre um alargamento da linha de fluorescência. Este alargamento pode ser natural, devido à existência de um tempo finito de transição entre os diferentes níveis atômicos (princípio de incerteza de Heisenberg), pode ser provocado pelo movimento dos átomos e moléculas nos meios gasosos, estes movimentos originam um desvio de frequência por efeito Doppler, ou simplesmente por transferência de energia devido a colisões atômicas e vibrações da rede cristalina.

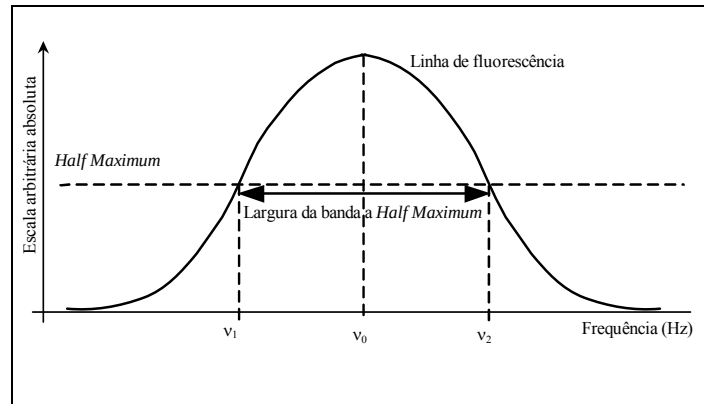


Figura 2.11 – Curva de fluorescência de uma emissão *laser* genérica.

Considerando uma linha de fluorescência como a da figura 2.11, a largura de fluorescência, $\Delta\nu$, é expressa em gama de comprimentos de onda, ou banda de frequências, compreendidas entre os dois pontos do gráfico da emissão espontânea a metade da amplitude máxima [7].

$$\Delta\nu = |\nu_2 - \nu_1| = \left| \frac{c\lambda_1 - c\lambda_2}{\lambda_1\lambda_2} \right| = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda_1\lambda_2} \quad (2.4)$$

Como a largura de banda é muito inferior ao valor de cada um dos comprimentos de onda ($\Delta\lambda \ll \lambda_1, \lambda_2$), a aproximação $\lambda_1 \times \lambda_2 = \lambda_0^2$, é válida. Pode assim considerar-se que o espectro de emissão é dado por:

$$\Delta\nu = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda_0^2}, \text{ ou seja } \Delta\lambda = \frac{c\Delta\nu}{\nu_0^2} \quad (2.5)$$

Assim, a coerência temporal é inversamente proporcional à largura de banda da emissão da fonte. A coerência temporal, usualmente expressa em unidades de comprimento, é uma medida do intervalo de tempo

em que as relações de fase se mantêm durante a propagação da frente de onda. Assim, o comprimento de coerência é obtido da seguinte expressão:

$$l_c = c \cdot \tau_c = \frac{c}{\Delta \nu} \quad (2.6)$$

Uma fonte emitindo numa frequência única tem um comprimento de coerência infinito enquanto que uma que emita em todo o espectro visível tem um comprimento de coerência de apenas alguns micrómetros. As técnicas interferométricas comuns para medir a largura espectral ou o comprimento de coerência de *lasers* baseiam-se em interferómetros de Fabry-Perot ou de Michelson [9] e na determinação da função visibilidade das franjas. A visibilidade das franjas é uma medida do grau de coerência da fonte [10].

A coerência temporal de um laser é função do comprimento da cavidade ressonante. Assim, quanto maior for a cavidade maior é o número de modos longitudinais existentes. Um artifício usual para que exista apenas a emissão num único modo longitudinal consiste na introdução de elementos ópticos, no interior da cavidade, com elevado ganho no modo que se pretende amplificar, e atenuação nos restantes, ver figura 2.12. Estes elementos ópticos são designados por etalons de Fabry-Perot e consistem num par de *interfaces* ópticas planas e paralelas. Nestes elementos as múltiplas reflexões que ocorrem nas interfaces óticas permitem amplificar apenas o modo longitudinal que se deseja, dimensionando devidamente a distância entre elas.

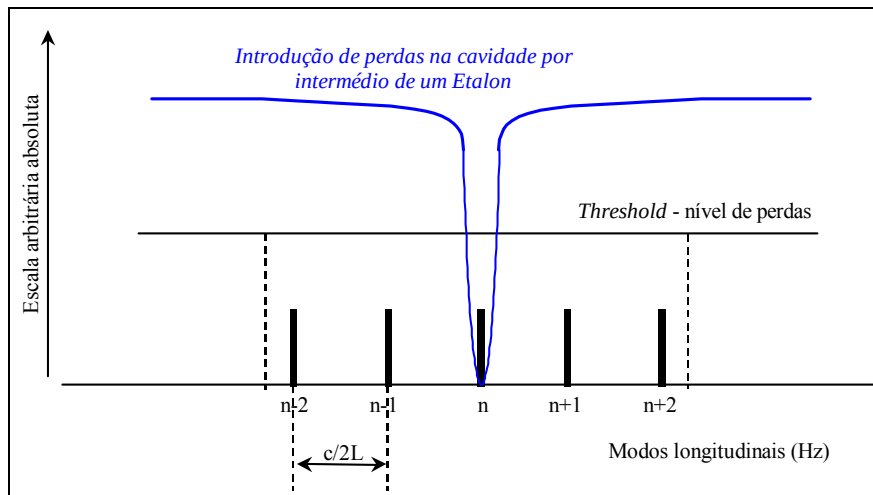


Figura 2.12 – Exemplo de cavidade ressonante a emitir num único modo longitudinal por introdução de perdas através de um elemento óptico.

A coerência espacial está associada ao facto de os campos electromagnéticos radiados pelos átomos terem as mesmas características de propagação no espaço que o campo incidente. Assim, num *laser* perfeito esperamos que o campo eléctrico varie, num instante, de uma maneira semelhante de ponto para ponto. Um feixe com estas características tem uma coerência espacial perfeita.

Direccionalidade

A direccionalidade da emissão é uma especificidade da emissão laser. Assim, nos primeiros momentos do processo, os fótons são emitidos em todas as direcções, em sincronismo com os fótons que estimulam a emissão. Todos eles, com excepção dos que se propagam ao longo do eixo da cavidade, rapidamente a abandonam e se escapam em todas as direcções através das faces laterais do cristal. O feixe axial mantém-se, todavia, e reforça-se mesmo à medida que oscila através do meio activo. É este processo que explica o extraordinário grau de colimação (excepto nos *lasers* semicondutores) do feixe *laser* emergente, que se comporta, no essencial, como uma onda plana coerente.

Este aspecto é importante porque permite, através de focagem, recolher a quase totalidade da energia do feixe. Daqui resulta a perigosidade das emissões laser pois mesmo quando as potências emitidas são baixas podem atingir-se densidades energéticas elevadas.

A divergência do feixe *laser* é condicionada pela difracção, sendo o ângulo de divergência em radianos e, nos limites da difracção, dado por:

$$\theta = \kappa \frac{\lambda}{D} \quad (2.7)$$

onde D é o diâmetro da abertura por onde emerge o feixe, k é um factor numérico com valor próximo de 1 e que depende da natureza do feixe [7]. Fora da cavidade *laser* o feixe diverge da maneira descrita na figura 2.13.

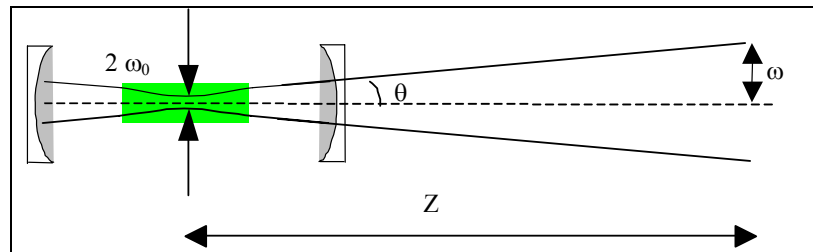


Figura 2.13 - Divergência do feixe *laser* fora da cavidade.

O valor de θ tende assintoticamente para $\arcsen\left(\frac{\omega}{z}\right)$ e como $\omega = \frac{z \lambda}{\pi \omega_0}$, para pontos relativamente afastados da cavidade *laser* obtém-se [7]:

$$\theta \cong \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \quad (2.8)$$

A divergência do feixe *laser* diminui com o aumento do seu diâmetro no colo do feixe ($2\omega_0$).

As características de coerência e direccionalidade, associadas à possibilidade de polarizar a emissão *laser*, fazem com que se trate de uma radiação com grandes potencialidades em aplicações de metrologia. Em

conclusão e estabelecendo uma analogia com as emissões em rádio-frequência, pode dizer-se que a radiação laser é o sinal enquanto a luz branca ordinária não passa de ruído óptico. Com este tipo de radiação, recorrendo a fenómenos de interferência, é possível codificar o espaço em fracções de comprimento de onda e medir deslocamentos desta ordem de grandeza.

2.1.4 - FENÓMENOS DINÂMICOS E NÃO-LINEARES

O interesse principal na geração de impulsos *laser* reside na possibilidade de obter com facilidade potências muito elevadas. Ao fazer incidir impulsos deste tipo em materiais tem-se acesso a muitos fenómenos até aí inacessíveis: os que ocorrem numa escala de tempo ultra-rápida ou os não lineares.

A resposta dos átomos a perturbações impostas externamente é fortemente dependente da intensidade da perturbação aplicada. Quer isto dizer que a resposta dos materiais varia de uma forma altamente não-linear com a intensidade da perturbação. Estas intensidades de energia elevadas podem obter-se recorrendo ao aumento das densidades de potência. Em geral, os regimes não lineares das interacções *radiação-matéria* são atingidos apenas com valores elevados de densidade de potência. O funcionamento dinâmico de um *laser* – geração de impulsos – vem permitir atingir os limiares da densidade de potência necessária para excitação e/ou monitorização de um grande número de fenómenos físicos.

Os *lasers*, por sua vez, podem ser classificados consoante o seu modo de funcionamento temporal. Estes modos de funcionamento são distintos pela forma e pela taxa a que a energia é enviada. Assim, temos 5 categorias de *laser*:

- i) De onda contínua (CW) – são os *lasers* em que o feixe de radiação coerente não sofre quaisquer interrupções no tempo, antes exibe uma estabilidade temporal elevada.
- ii) De impulso único (modo normal) – estes *lasers* têm geralmente impulsos cuja duração varia desde algumas centenas de micro-segundos até alguns mili-segundos.
- iii) De *Q-switching* individual – estes *lasers* emitem um impulso que resulta de atrasos intra-cavidade, o que permite ao meio activo armazenar o máximo de energia potencial.
- iv) De *Q-switching* repetitivo – os *lasers* a operar neste regime geram impulsos numa gama de frequências que pode variar de alguns impulsos por segundo até dezenas de milhares de impulsos por segundo.
- v) De *Mode-locked* – estes *lasers* funcionam num regime que depende dos modos ressonantes da cavidade que podem afectar as características do feixe de saída. Quando a fase de diferentes modos estão sincronizadas, i.e., *locked*, os diferentes modos interferem entre si de forma a gerar um batimento.

O regime de funcionamento temporal de um laser, ou seja, o seu comportamento dinâmico pode ser controlado de duas formas distintas para obter a geração de impulsos:

- Com modulação directa da taxa de excitação, de modo a criar uma inversão de população apenas durante certos intervalos de tempo (eficaz para gerar impulsos relativamente longos – μs),
- A taxa de modulação constante, recorrendo a mecanismos adicionais de modulação. Estes mecanismos poderão ser externos ou internos à cavidade laser. Os primeiros são meros interruptores ou obturadores do feixe, que não introduzem qualquer alteração à intensidade do feixe. Os últimos, por sua vez, afectam directamente o número de fotões que circula na cavidade e por isso alteram as equações de balanço atómico.

Os dois tipos de estratégias mais comuns para obter impulsos curtos (na escala do nano, pico ou femtosegundo) são designadas por *Q-Switching* e *Mode-Locking*.

O primeiro, *Q-Switching*, como o nome indica, está relacionado com a comutação rápida do factor-Q da cavidade laser, entre dois valores: um elevado e outro baixo. Refira-se que o factor-Q é um parâmetro matemático relacionado com a realimentação óptica da cavidade: um factor-Q elevado significa baixas perdas internas, espelhos bem alinhados, elevada realimentação; um factor-Q baixo significa o exactamente o oposto.

O *Mode-Locking* baseia-se na sincronização de fase dos diversos modos axiais em oscilação num laser. Para tal, recorre-se a uma modulação das perdas da cavidade em perfeito sincronismo com o tempo que os fotões demoram a percorrer uma distância igual ao dobro do percurso óptico na cavidade. Os fotões atrasados ou adiantados em fase são atenuados pelas perdas, os fotões em sincronismo de fase mantêm esse sincronismo. Após algumas voltas no interior da cavidade estabelece-se um regime de oscilação de um conjunto de modos em perfeito sincronismo de fase. A criação de batimentos entre os modos não atenuados gera impulsos de elevada intensidade em intervalos de tempo muito curtos.

Neste parágrafo apenas o funcionamento em *Q-Switching* será abordado, uma vez que nesta tese apenas foram utilizados *lasers* em regime *Q-Switching*: Nd:YAG (repetitivo) e Rubi (individual).

Q-Switching

A geração de impulsos em *Q-switching* é fácil de realizar e permite obter, num ciclo de operação, um ou múltiplos impulsos. Neste modo de operação, fácil de sincronizar com eventos externos, é possível variar o tempo entre impulsos e acompanhar no tempo um fenómeno transitório que possa ser repetido. A facilidade de operação e a versatilidade no controlo dos tempos entre disparos, dentro dos limites de operação do laser, fazem com que este sistema de funcionamento seja o mais recomendado para a maioria das medições com interferometria em Mecânica Experimental. Este tipo de operação é normalmente utilizado quando é necessário recorrer a iluminação pulsada.

Impulsos individuais de elevada energia podem ser obtidos através da introdução temporária de perdas elevadas na cavidade. Desta forma é evitada a emissão *laser* mesmo no caso de ser provocada uma inversão de população. As perdas elevadas evitam a oscilação *laser* durante o bombeamento da energia para o meio activo. Se, quando uma elevada inversão de população é atingida, as perdas da cavidade forem eliminadas (Q

aumenta) a oscilação *laser* recomeça instantaneamente. Desta forma o ganho diminuirá rapidamente devido à transformação de toda a energia acumulada em fótons gerados por emissão estimulada.

O *Q-switch* (variação rápida do *Q* da cavidade) é posto em prática pela colocação de um interruptor (*switch*) no interior da cavidade, isolando efectivamente o meio *laser* do resto da cavidade. Após o bombeamento do meio *laser* o interruptor é aberto, restaurando o *Q* da cavidade e permitindo a libertação de energia por emissão de um feixe de luz coerente. Para se obter um *Q-switch* eficiente na geração de impulsos múltiplos dois factores devem ser tidos em conta:

- a) a taxa de bombeamento deve ser mais elevada que o decaimento espontâneo de forma a permitir obter uma elevada inversão de população, e,
- b) o *Q-switch* deve ser actuado num intervalo de tempo inferior ao necessário à inversão da população, caso contrário o segundo impulso não beneficiará do *Q-switch* para um novo impulso de elevada energia.

A forma corrente de realizar o *Q-switch* de um *laser* é recorrendo moduladores electro-ópticos. Entre eles, as células de *Pockels* são as mais frequentemente utilizadas. Na figura 2.14 representa-se a configuração de uma cavidade *laser* com uma célula de *Pockels* para realizar o efeito de *Q-switch*. De notar que a radiação deve ser polarizada pois é a polarização da radiação que permite variar o ganho da cavidade.

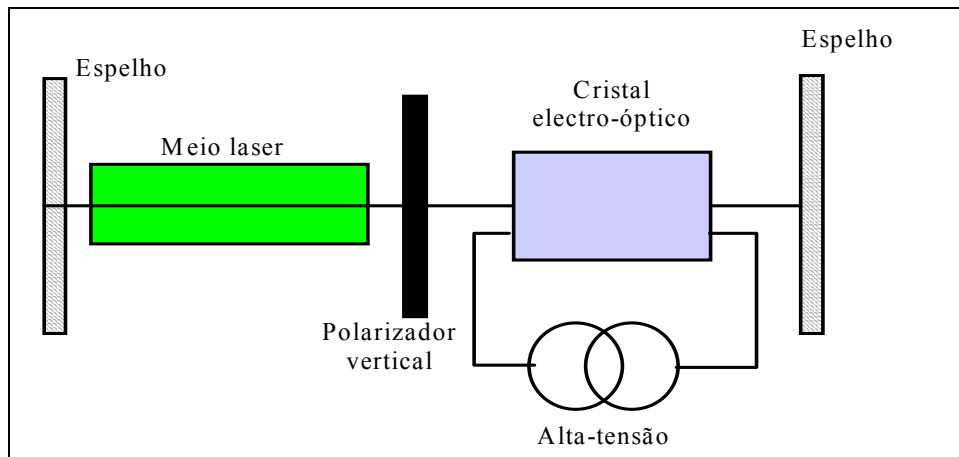


Figura 2.14 – Representação esquemática de uma cavidade laser com variação de ganho por célula de Pockels

Uma alta-tensão é aplicada à célula de forma a esta funcionar como uma lâmina $\lambda/4$, a qual converte uma polarização linear numa polarização circular. O espelho reflecte esta luz e ao fazê-lo inverte a direcção de rotação do vector polarização pelo que ao passar de novo na célula de *Pockels* a luz sairá com uma polarização perpendicular a sua polarização de origem e não atravessará o polarizador (a cavidade está em aberto – *switch off*). Quando a tensão na célula volta a zero não existe rotação do plano de polarização e a cavidade está em circuito fechado, ocorre *Q-switch*. A variação de tensão, se sincronizada com o mecanismo de bombeamento, pode ser conseguida em menos de 10 ns [7].

Gerador de segundo harmónico – um método prático de alcançar frequências mais elevadas

No tratamento clássico da propagação da luz pressupõe-se, a nível atómico, uma relação linear entre o campo electromagnético e a resposta do meio. No entanto, é plausível supor que um feixe luminoso de intensidade elevada desencadeie efeitos não lineares apreciáveis. Os campos eléctricos criados por fontes convencionais são demasiado fracos para que tais efeitos sejam observados com facilidade. Por esta razão só o advento da radiação *laser* permitiu reunir a energia necessária para observar estes fenómenos no domínio óptico do espectro.

Os efeitos não lineares são analisados considerando a resposta a nível atómico do material dieléctrico a campos eléctricos de feixes luminosos intensos. A propagação de uma onda através do material produz alterações na distribuição espacial e temporal das cargas eléctricas porque os electrões e átomos reagem aos campos electromagnéticos das ondas. O efeito principal das forças exercidas pelos campos nas partículas carregadas é o deslocamento dos electrões de valência das suas órbitas normais. Esta perturbação cria dipólos eléctricos cujas manifestações macroscópicas são a polarização. Para campos eléctricos de baixa intensidade esta polarização é proporcional ao campo eléctrico E . Pode pois escrever-se:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad (2.9)$$

em que χ é uma constante adimensional conhecida como susceptibilidade eléctrica. O tratamento mais rigoroso deste assunto exige que a relação entre $\mathbf{E}$ e $\mathbf{P}$ se estabeleça, não através de uma constante escalar, mas sim através de um conjunto de quantidades organizadas sobre a forma de um tensor, o tensor de susceptibilidade.

Considerando um forte campo eléctrico oscilante introduzido por um *laser* num cristal sem centro de simetria - *as posições dos átomos no cristal não podem passar para posições equivalentes pela operação de simetria designada por "inversão"* - o campo eléctrico do *laser* vai polarizar os electrões distribuídos no átomo de uma forma assimétrica. A inexistência de centro de simetria é condição necessária para a geração do segundo harmónico [11]. Neste caso:

$$\mathbf{P} = \alpha_1 \mathbf{E} + \alpha_2 \mathbf{E}^2 \quad (2.10)$$

As constantes α_i descrevem a susceptibilidade eléctrica. Aqui a re-radiação resulta de dipólos cujas amplitudes não reproduzem fielmente o campo eléctrico sinusoidal que os gerou. Como resultado deste fenómeno a onda obtida contém frequências diferentes da onda original.

Considere-se, então, a propagação de uma onda luminosa da forma:

$$\mathbf{E} = E_0 \sin \omega t \quad (2.11)$$

a equação da polarização pode escrever-se da seguinte forma [12]:

$$\mathbf{P} = \alpha_1 E_0 (\sin \omega t) + \frac{1}{2} \alpha_2 E_0^2 - \frac{\alpha_2 E_0^2}{2} (\cos 2\omega t) \quad (2.12)$$

Os componentes da polarização na frequência relacionam-se com os componentes da frequência da onda re-emitida. Para além da luz incidente de frequência f_0 observa-se um 2º harmónico de frequência $2f_0$. Desta forma vemos que, usando argumentos teóricos simples, uma onda de 2º harmónico deverá ser gerada.

Numa representação corpuscular do fenómeno pode conceber-se que dois fotões de energia $h\omega$ coalescem no interior do meio e dão origem a um único fotão de energia $2h\omega$. A duplicação de frequência foi o primeiro efeito não-linear observado com um *laser* de ruby, em 1961, por Franken et al. [12].

Para observar este fenómeno devem ser escolhidos cristais e direcções de observação adequadas em relação ao eixo do cristal. A principal razão para este cuidado na observação do fenómeno deve-se ao facto da onda de frequência $2f_0$ ter uma velocidade de propagação diferente da velocidade da onda original no cristal. Isto é uma consequência da dependência do índice de refacção na frequência ou seja, da dispersão, este efeito está esquematicamente representado na figura 2.15 a).

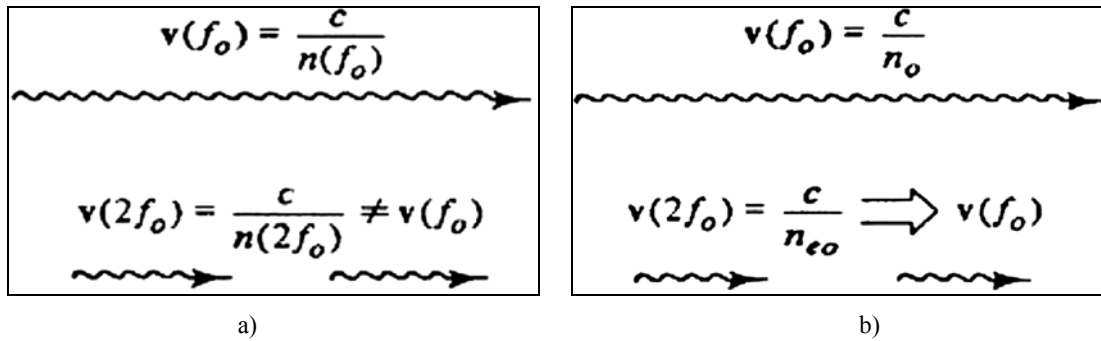


Figura 2.15 – Dependência do índice de refacção com a frequência da radiação electromagnética. Propagação da frequência fundamental e do segundo harmónico num cristal uniaxial

A onda fundamental produz harmónicos secundários ao atravessar o cristal. As ondas secundárias produzidas em diferentes instantes não estão em fase umas com as outras e não são, por isso, adicionadas em fase pelo que sofrem atenuação. É, todavia, possível produzir eficientemente o segundo harmónico através de um procedimento conhecido como ajuste do índice. Este procedimento é insensível aos efeitos da dispersão e garante a igualdade entre os índices, isto é, $n_{\omega} = n_{2\omega}$.

Ao considerar-se um cristal uniaxial, se a onda fundamental o percorrer como um raio "ordinário" e o segundo harmónico o percorrer como o raio "extraordinário", o problema da atenuação pode ser resolvido. Pode assim escolher-se uma direcção onde o raio "ordinário" (f_0) e o raio "extraordinário" ($2f_0$) têm os índices de refacção desejados de forma a que todos viajem com a mesma velocidade, ver figura 2.15 b).

Para se usar esta solução é importante que a onda original no cristal produza o segundo harmónico na direcção de polarização perpendicular a ocorrência deste fenómeno depende do tipo de cristal utilizado. Na descrição matemática da polarização de um cristal que é feita pelo tensor de polarização, se certos coeficientes do tensor forem diferentes de zero, o acoplamento da direcção do raio "ordinário" para a direcção do raio "extraordinário" é possível [12]. Este é o caso do KDP (*Potassium Dihydrogen Phosphate*) que é o material utilizado mais frequentemente para gerar o segundo harmónico. Nos lasers de Nd:YAG, são

os cristais de KDP que permitem realizar com grande eficiência a duplicação de frequência de 1064 nm (infravermelho) para a radiação visível verde, a 532 nm.

2.1.5 - O SPECKLE

As técnicas de interferometria *laser* estão associadas aos fenómenos que envolvem padrões de granitado *laser* (padrões de *speckle*). Os primeiros trabalhos com um *laser* contínuo (He-Ne, 1961) puseram em evidência este fenómeno. Com efeito, a imagem da superfície de um objecto iluminado por um *laser* adquire uma aparência granular, cujas dimensões de grão e distribuição espacial dependem do observador, da posição deste e dos níveis de iluminação.

Apesar de em muitas situações o fenómeno de *speckle* poder ser considerado como ruído, os grãos que o constituem são portadores da informação de fase da frente de onda, onde está codificada a informação relativa ao estado da superfície de um objecto. Esta codificação pode ser utilizada em técnicas específicas de medição de deslocamentos de superfície, como é o caso das técnicas de Interferometria de *Speckle* que se descrevem nesta tese.

Como se observa na figura 2.16, a estrutura detalhada deste granitado não tem nenhuma relação óbvia com as propriedades macroscópicas do objecto iluminado, antes pelo contrário, apresenta-se caótica e desordenada, com um padrão irregular que é melhor descrito pelos métodos da Estatística.

O *speckle* é observado sempre que uma superfície rugosa reflectora, com uma rugosidade média da ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação ou maior, é iluminada por luz coerente. A intensidade luminosa num qualquer ponto afastado da superfície resulta do somatório de um conjunto de frentes de onda esféricas parcialmente coerentes, cada uma originada por um elemento difusor diferente da superfície [13]. A interferência destas ondas com intensidades e fase aleatórias, mas coerentes entre si, origina um padrão com aspecto granitado. Se a fonte óptica não for coerente, há uma integração temporal que origina uma imagem uniforme e sem granitado.

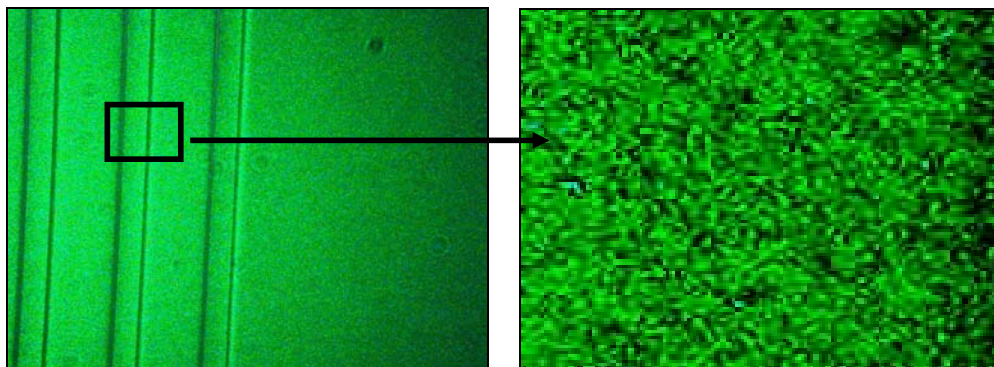


Figura 2.16 – Superfície rugosa de um objecto iluminada por luz coerente, ampliação mostrando a estrutura do *speckle*.

É de notar que a diferença na dimensão dos grãos de *speckle* não depende da rugosidade da superfície, mas sim da resolução do sistema óptico formador da imagem, ou seja, no caso de uma lente, da sua abertura numérica, como se mostrará mais adiante.

O fenómeno de *speckle* pode ser observado de duas formas diferentes:

- através da sua propagação livre no espaço, *speckle objective*,
- através da sua propagação num sistema formador de imagem, *speckle subjectivo*.

Apesar do fenómeno de *speckle* ser um efeito de interferência tri-dimensional, para a maior parte das aplicações, as características mais importantes são o tamanho e brilho do padrão de *speckle* sobre um plano.

A descrição do fenómeno de *speckle*, aqui apresentada, vai basear-se na configuração óptica em que existe um sistema formador de imagem, i.é, de um *speckle* subjectivo. A razão desta escolha prende-se com o facto de que nos sistemas de Interferometria de *Speckle* se utilizarem geralmente lentes formadoras de imagem.

O brilho do speckle

O estudo das propriedades estatísticas do padrão de *speckle* passa pela determinação das funções densidade de probabilidade do campo complexo da intensidade e da fase, pois na maior parte das experiências ópticas é a intensidade da radiação que é medida.

Considere-se que um objecto com uma superfície difusora é iluminado e observado num plano detector através de um sistema óptico centrado, ver figura 2.17. Na parte posterior do sistema óptico é introduzido um diafragma.

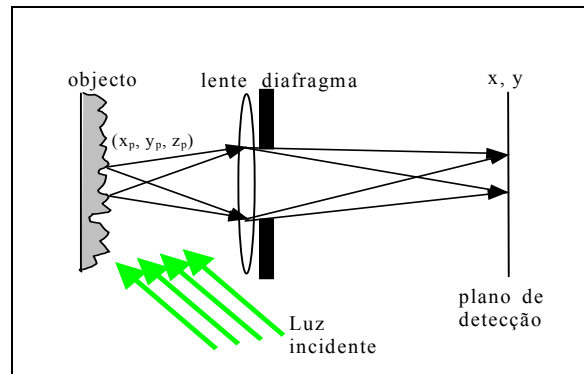


Figura 2.17 – Formação de *speckle* subjectivo através de um sistema óptico formador de imagem.

Segundo o princípio de Huygens, cada ponto da superfície do objecto, que é iluminado coerentemente, comporta-se como uma fonte de emissão esférica secundária, cujo campo eléctrico se pode descrever como:

$$E_n(r_n) = \frac{A_n}{r_n} e^{i(k \cdot r_0 + \phi_n)} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (2.13)$$

Nesta equação n representa o ponto emissor da superfície difusora de luz e N é o número total de pontos de emissão de luz na superfície. A dependência temporal é aqui omitida pois a fase entre os diferentes trens de

onda emitidos é temporalmente constante [14]. A fase ϕ_n , no entanto, varia fortemente de ponto para ponto. Assim, num dado ponto do espaço, (x, y), todas as contribuições energéticas da superfície se somam segundo a seguinte equação:

$$E_n(x, y) = \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{r_n} e^{i(k \cdot r_0 + \phi_n)} \quad (2.14)$$

onde r_n é a distância do ponto da superfície considerado até ao ponto (x, y). O somatório desta equação é análogo ao somatório existente no problema clássico do passeio aleatório a duas dimensões. Cada onda esférica pode ser representada por um vector no plano complexo, sendo o campo resultante dado pelo somatório complexo dos vectores. Como não existe qualquer relação entre a área de emissão elementar de uma superfície rugosa e as outras e entre a intensidade de cada vector de difusão e a sua fase, a magnitude do campo eléctrico pode ser descrita por:

$$E_n(r_n) = \frac{1}{\sqrt{N}} |A_n| e^{i(\phi_n)} \quad (2.15)$$

Em superfícies difusoras de luz, a amplitude $|A_n|/\sqrt{N}$ e a fase ϕ_n de cada onda são estatisticamente independentes umas das outras. Além disso, as fases ϕ_n estão uniformemente distribuídas no intervalo $]-\pi, \pi]$. Esta uniformidade da distribuição da função densidade de probabilidade de fase, ρ_{ϕ} , pode ser descrita como:

$$\rho_{\phi}(\phi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & (se \quad -\pi < \phi \leq \pi) \\ 0 & \end{cases} \quad (2.16)$$

Esta distribuição da densidade de probabilidade uniforme de fase está representada na figura 2.24. Pelo contrário, a densidade de probabilidade da intensidade de um padrão de *speckle* não é uniforme, ela obedece a uma distribuição de probabilidade exponencial negativa, como se representa na figura 2.18 [14]. Esta densidade é descrita por:

$$\rho_I(I) = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} I} & (se \quad I \geq 0) \\ 0 & \end{cases} \quad (2.17)$$

Na equação 2.17 σ^2 é a variância da intensidade.

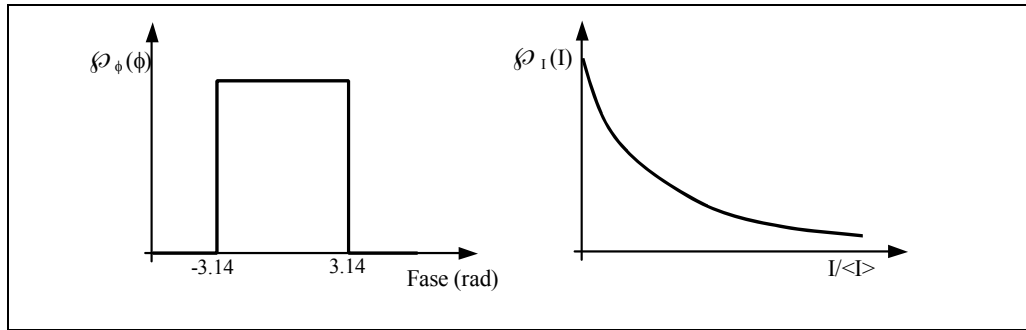


Figura 2.18 – Representação gráfica da densidade de probabilidade da fase e da intensidade de um padrão de *speckle*.

Como se referiu anteriormente, a fase e a intensidade são estatisticamente independentes num qualquer ponto. Pode pois verificar-se que o valor médio da intensidade, $\langle I \rangle$, de um padrão de *speckle* é $2\sigma^2$. Assim, substituindo na equação 2.17 a variância da intensidade pelo seu valor médio, obtém-se:

$$\phi_I(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} e^{-\frac{I}{\langle I \rangle}} \quad (2.18)$$

O contraste pode ser medido por $C = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}$, pelo que, o contraste de um padrão de *speckle* completamente

polarizado é igual a 1.

Um campo de *speckle* diz-se igualmente polarizado sempre que a radiação laser ilumina superfícies onde a luz polarizada sofre uma única difusão (metais, vidros, compósitos). No entanto muitas outras superfícies apresentam um efeito despolarizante. Mais ainda, algumas superfícies necessitam da deposição de uma camada de pintura difusora para que estas reflectam uma quantidade de luz suficiente para o sistema óptico. Nestas superfícies a luz penetra ligeiramente e sofre múltiplas difusões, pelo que a radiação resultante é despolarizada. O campo de *speckle* assim obtido é considerado como parcialmente desenvolvido [14].

Neste caso o campo de *speckle* é a soma de dois campos de *speckle* não correlacionados e polarizados ortogonalmente. A distribuição de intensidade correspondente tem as mesmas propriedades estatísticas que a soma das intensidades de dois padrões de *speckle* incoerentes e, considerando que as intensidades dos campos é idêntica, tem-se:

$$p_I(I) = \frac{4}{\langle I \rangle^2} e^{-\frac{2I}{\langle I \rangle}} \quad (2.19)$$

em que I representa a soma das intensidades dos dois campos de *speckle*. Na figura 2.19 a função densidade de probabilidade de um único padrão de *speckle* e de dois padrões incoerentes entre si, são representadas.

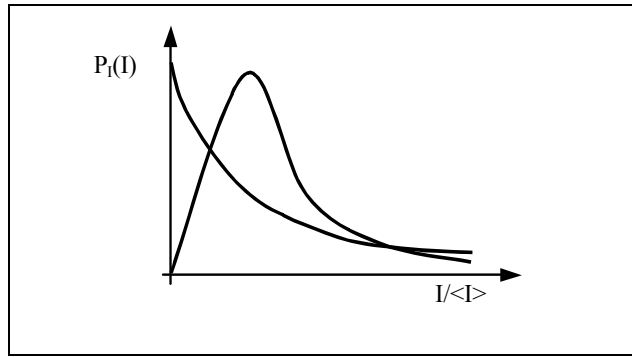


Figura 2.19 – Comparação da função densidade de probabilidade de um padrão de *speckle* e de dois padrões de *speckle* associados incoerentemente.

Esta figura mostra que o valor de brilho mais provável para um *speckle* é 0, i.é., existem mais grãos de *speckle* escuros do que grãos de *speckle* de outro qualquer brilho. Observa-se ainda que se dois campos independentes de *speckle* se sobrepuserem, a probabilidade de se encontrarem grãos de *speckle* sem brilho tende para zero.

O tamanho do speckle

As considerações anteriores estavam limitadas às propriedades estatísticas do *speckle* num único ponto. Tais considerações são suficientes para descrever as flutuações de brilho, mas insuficientes para descrever outra propriedade fundamental: a sua estrutura espacial.

A função de autocorrelação, $R_I(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle I(x_1, y_1) \cdot I(x_2, y_2) \rangle$, dá, segundo Goodman [14], uma medida razoável das dimensões médias do *speckle*. Para o cálculo de R considera-se que a superfície é rugosa quando comparada com λ e que o campo A (x,y) é gaussiano. Pode-se, para este caso, exprimir a função de autocorrelação de intensidade em termos da função de autocorrelação dos campos [14]:

$$\begin{aligned} R_I(x_1, y_1; x_2, y_2) &= \langle I(x_1, y_1) \rangle \cdot \langle I(x_2, y_2) \rangle + |J_A(x_1, y_1; x_2, y_2)| \\ J_A(x_1, y_1; x_2, y_2) &= \langle A(x_1, y_1) \cdot A^*(x_2, y_2) \rangle \end{aligned} \quad (2.20)$$

Considerando uma iluminação uniforme do objecto e uma área de difusão uniforme maior que a resolução espacial da lente utilizada, a função de autocorrelação da intensidade no plano de imagem é obtida a partir da seguinte expressão [14]:

$$R_a(r) = \langle I \rangle^2 \left(1 + \frac{\left| 2J_1\left(\frac{\pi D_l r}{\lambda z}\right) \right|^2}{\frac{\pi D_l r}{\lambda z}} \right) \quad (2.21)$$

em que D_l é o diâmetro da pupila de entrada da lente, J_1 é a função de Bessel de primeira ordem, λ é o comprimento de onda da luz utilizada, z é a distância do plano de imagem até ao plano da pupila de entrada da lente e $r = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}$.

O tamanho médio do *speckle*, d_s , é dado pelo primeiro mínimo da função de Bessel [15]. Como $J_1(x) = 0$ para $x = 1.22 \pi$, obtém-se:

$$d_s = \frac{1.22 \lambda z}{D_l} \quad (2.22)$$

O tamanho do *speckle* no plano de imagem pode ser relacionado com a abertura numérica do sistema óptico, que é dada por:

$$NA = \sin(\theta_i) \cong \frac{D_l}{2f} \quad (2.23)$$

em que θ_i representa o ângulo de convergência no espaço imagem e f é a distância focal da lente [15]. Como $z = f$, no plano de imagem, o tamanho do *speckle* pode tomar a seguinte forma:

$$d_s = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad (2.24)$$

O tamanho do *speckle* no plano de imagem depende, então, da abertura numérica do sistema óptico. Se a abertura da lente diminui, o tamanho do *speckle* aumenta, e vice-versa. Este facto é apresentado na figura 2.20.

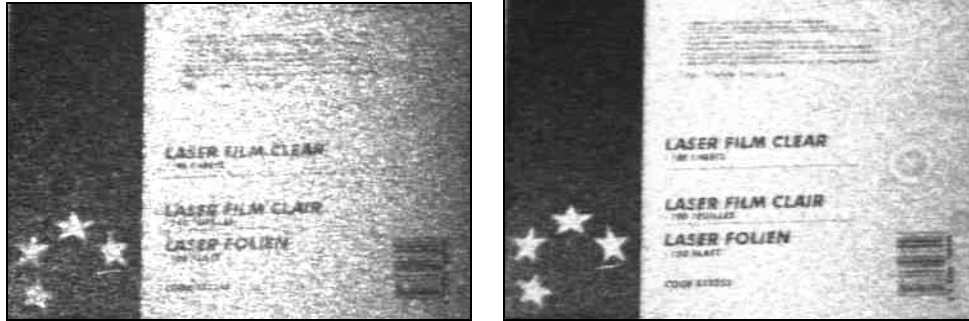


Figura 2.20 – Imagem de um objecto iluminado com um *laser* através de um sistema óptico de abertura $f/8$ e $f/16$.

A máxima frequência espacial, $f_{\text{máx.}}$, no padrão de *speckle* é dada pelo tamanho da lente (abertura), e a distância da lente ao plano de observação:

$$\frac{1}{f_{\text{máx}}} = \frac{\lambda z}{D} \quad (2.25)$$

Em conclusão podemos considerar os padrões de *speckle* como um conjunto de redes aleatórias com frequência espacial variável que codificam a informação da superfície, sendo a máxima frequência imposta pelo sistema óptico [16]. Do ponto de vista da Mecânica Experimental dois parâmetros são importantes. Em primeiro, e mais importante, o padrão de amplitude no plano de imagem está correlacionado de uma maneira única com as propriedades da superfície iluminada. Para pequenos deslocamentos no-plano, o padrão de *speckle* mantém-se agarrado ao relevo da superfície mesmo sendo esta deformada. Na direcção fora-do-plano o padrão de *speckle* é como que esticado e é relativamente insensível a este tipo de deslocamento.

O segundo parâmetro importante para as aplicações em Mecânica Experimental é o de que o tamanho dos grãos no plano de imagem é determinado pelo sistema óptico e pelo comprimento de onda da iluminação, equação 2.25. Assim, é possível ajustar opticamente o sistema formador de imagem para que o tamanho dos grãos de *speckle* seja compatível com o tamanho dos *pixels* de um detector CCD.

2.2 – FUNDAMENTOS DA INTERFEROMETRIA DE SPECKLE

A possibilidade de utilizar a natureza ondulatória da luz para medir quantidades macroscópicas é conhecida desde há muito. Uma das primeiras observações da interferência da luz foi registada por Isaac Newton [17]. Mais tarde foi Young quem realizou a experiência que revela directamente o carácter ondulatório da luz [18]. A partir dessa data numerosas configurações de interferómetros foram desenvolvidas: Michelson, Mach-Zehnder, Fabry-Perot, Sagnac,...

A maior parte destes interferómetros foi utilizado na indústria óptica por serem excelentes ferramentas para a determinação da qualidade de produtos tais como espelhos, lentes e superfícies ópticas em geral. Estes objectos especulares viam as suas superfícies serem comparadas interferometricamente com superfícies perfeitamente conhecidas. O problema das medições interferométricas sobre objectos opacos ou difusos foi levantado apenas com o advento da holografia (1949) e do *LASER* (1960) e com as primeiras aplicações da Interferometria Holográfica (IH) em 1965 [2,19,20,21,22].

A partir desta data a IH não parou de avançar. Para além do desenvolvimento verificado nas fontes luminosas, através dos *lasers*, a introdução do processamento electrónico de dados permitiu digitalizar os registos holográficos e analisá-los através de técnicas de tratamento de imagem. Esta vantagem passou a ser utilizada plenamente a partir da década de 70 com o desenvolvimento das técnicas de Interferometria de *Speckle*. Nestas o registo da informação da superfície do objecto em estudo é realizado directamente em vídeo através da gravação de padrões de *speckle*.

O desenvolvimento de sistemas de medida baseados nestas técnicas e a sua interacção com problemas de Engenharia em muito beneficiou a Mecânica Experimental. A grande sensibilidade da interferometria, permitindo medir deslocamentos da ordem da fracção de micrometro, associada à possibilidade de trabalhar

sobre superfícies opacas, com pouca preparação prévia, faz com que a Interferometria de *Speckle* tenha vindo progressivamente a ocupar o lugar de alguns métodos clássicos. A aplicação da Interferometria de *Speckle* pode ser a solução para um número elevado de problemas ligados à análise de vibrações [21], à medição de deformações em superfícies [22], à detecção de fendas [23], ... , fora de ambientes laboratoriais.

2.2.1 - HOLOGRAFIA

Por holografia designa-se o processo que permite gravar, em meio apropriado, toda a informação referente a uma frente de onda, isto é, as suas distribuições espaciais de amplitude e de fase. O registo obtido designa-se por holograma, palavra que deriva do grego “holos”, que significa “o todo”. Desta forma, com um holograma, é possível reconstruir completamente, em diferido, a frente de onda inicial permitindo obter imagens cujas características de tri-dimensionalidade em nada se distinguem das cenas gravadas.

Na fotografia, que também é um registo de uma frente de onda, fica apenas gravada informação sobre a distribuição da amplitude do vector luminoso (mais propriamente, o quadrado da amplitude, a intensidade). Nestes registos não é gravada qualquer informação de fase.

Em holografia a gravação de fase é obtida por fenómenos de interferência, pelo que o registo holográfico só conduz a resultados satisfatórios se utilizado com fontes de luz coerente. Por este motivo, embora os princípios básicos da holografia tenham sido publicados em 1948 por Dennis Gabor [19,24], só o aparecimento do *laser* em 1960 permitiu vulgarizar a sua utilização. Para isso muito contribuíram os trabalhos de Leith e Upatnieks [20,25,26] que pela primeira vez apresentaram um método para gravar hologramas de superfícies difusas. A figura 2.21 representa uma das formas mais simples de registar um holograma de um objecto opaco.

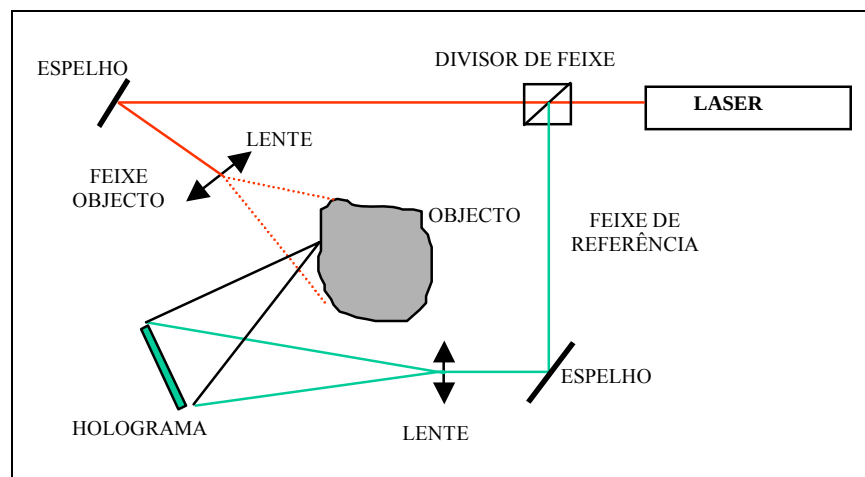


Figura 2.21 – Esquema experimental para a realização de um registo holográfico.

O feixe *laser* é dividido em dois por um *beam-splitter* indo um dos feixes resultantes iluminar o holograma, *feixe de referência*, enquanto o outro é utilizado na iluminação do objecto, *feixe objecto*. O feixe de iluminação é posteriormente reflectido pela superfície do objecto em todas as direcções, incluindo a direcção do registo holográfico. Este é normalmente realizado sobre uma placa de vidro possuindo uma emulsão fotográfica num dos lados. Os dois feixes coerentes, objecto e referência, são sobrepostos sobre a superfície da emulsão fotográfica resultando um padrão de interferência. Desta forma obtém-se, sobre a emulsão fotossensível, locais de diferentes intensidades luminosas que reagem com os cristais de prata gravando o padrão. Esta rede de interferência contém toda a informação do objecto, isto é, a distribuição de amplitude e fase da frente de onda proveniente da sua superfície, e fica registada no holograma.

Na reconstrução do holograma, representada na figura 2.22, as diferentes zonas claras e escuras gravadas na emulsão servem de rede de difracção em relação ao feixe de referência que é usado como iluminação.

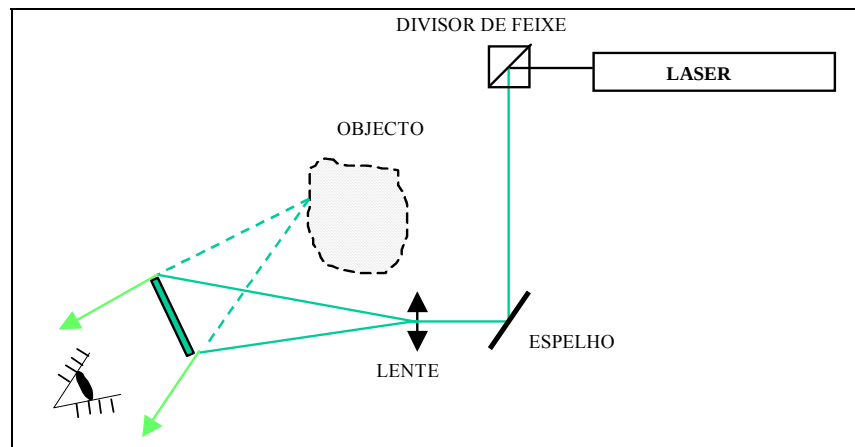


Figura 2.22 – Esquema para a reconstrução da imagem

Os raios difractados por esta rede permitem obter um grupo de frentes de onda idêntico ao que, na fase de registo, atravessaria a emulsão fotográfica se esta fosse transparente. Quando este conjunto de ondas é observado por alguém que se encontra por detrás do holograma, o observador é incapaz de distinguir se a imagem provém directamente do objecto ou se resulta dos raios difractados pelo holograma. A imagem do objecto é observada exactamente no mesmo lugar onde antes este se encontrava.

A capacidade de registo de fase dá à holografia a possibilidade de medir alterações da frente de onda da luz enviada por um objecto. É esta capacidade que é interessante do ponto de vista da Mecânica Experimental. Muitos fenómenos físicos provocam alterações na superfície de uma estrutura que quando transformadas em variações de fase óptica são de amplitude adequada para serem tratadas através de registos holográficos.

Uma das aplicações mais importantes da holografia consiste na interferometria holográfica. Este nome designa as técnicas interferométricas que envolvem duas ou mais frentes de onda e onde pelo menos uma delas é reconstituída por um registo holográfico.

2.2.2 – INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA

A interferometria holográfica foi descoberta nos finais de 1964, por Robert Powell e Karl Stetson [21,27]. O princípio da interferometria holográfica é o de que a frente de onda emitida por um objecto pode interferir com a frente de onda do mesmo objecto emitida num instante diferente. Desta forma, zonas escuras são criadas no espaço em pontos onde a diferença de fase relativa é um múltiplo ímpar de π .

A interferometria holográfica oferece a possibilidade de aplicar a precisa técnica da interferometria a objectos opacos e difusos e com geometria complexa. Nesta técnica a frente de onda proveniente da superfície do objecto é utilizada como referência dela própria.

Para que este processo seja possível é necessária a gravação de dois, ou mais, registos holográficos, que são sobrepostos, para criar um padrão de interferência que é designado por interferograma. Três técnicas se distinguem para a obtenção dos padrões de correlação em interferometria holográfica: a dupla exposição, o tempo real e a média temporal (*time-average*). Uma breve descrição destas técnicas será dada em seguida:

- I. O método da **dupla exposição** implica que os hologramas de um objecto em dois estados ligeiramente diferentes sejam gravados na mesma placa fotossensível. Quando a reconstrução é efectuada obtém-se uma imagem com franjas de interferência situadas nas zonas do objecto que sofreram deslocamentos entre as duas exposições. O registo obtido pode ser descrito como um padrão de interferência criado pela correlação entre os hologramas reconstruídos em simultâneo.
- II. A interferometria em **tempo real** consiste na gravação de um holograma de um objecto num determinado estado. Após a revelação do holograma, este é recolocado na sua posição original de forma que ao objecto real se sobreponha a sua imagem holográfica. Se a superfície do objecto se deslocar em relação à sua posição de referência serão observadas franjas de interferência. Um registo contínuo da variação dos deslocamentos no tempo pode ser obtido através da gravação em vídeo do padrão de interferência durante o carregamento do objecto.
- III. A **média temporal** (ou *time-average*) baseia-se no registo de hologramas de objectos em vibração e é particularmente útil no estudo das oscilações harmónicas de pequenas amplitudes. Neste caso, o holograma é exposto durante um intervalo de tempo que é elevado quando comparado com o período da oscilação em análise. O holograma gravado pode ser entendido como a sobreposição de um conjunto de hologramas registando as várias posições ocupadas pelo objecto. As franjas de interferência na imagem reconstruída revelam zonas de igual amplitude de oscilação, cuja intensidade é modulada por uma função de Bessel de ordem zero resultante da modulação de fase.

São muitas as vantagens da Interferometria Holográfica sobre as técnicas convencionais de Mecânica Experimental sendo as principais:

- **Menor tempo de ensaio**, pois sendo técnicas globais permitem a observação do comportamento de superfícies de uma só vez;
- **Ausência de contacto** com a superfície em estudo;

- **Elevada resolução e sensibilidade**, pois a grandeza de medida associada, deslocamentos, é da ordem de fracções do comprimento de onda da luz incidente. Normalmente considera-se que a resolução é de $\lambda/10$ para interferogramas sem tratamento de imagem e de $\lambda/100$ após processamento digital das imagens.

Apesar destas vantagens estas técnicas apresentam, contudo, algumas limitações importantes. Estas dizem respeito à sua elevada sensibilidade a vibrações externas durante o registo dos hologramas e à necessidade de revelar quimicamente os registos holográficos. Dada a elevada frequência espacial dos padrões os meios de registo holográfico devem possuir elevada resolução (3 000linhas/mm), são, por isso, elaborados com emulsões de grão fino. Desta forma apresentam pouca sensibilidade à luz, como são normalmente utilizados *lasers* de baixa potência os tempos de exposição são elevados, podendo chegar a alguns minutos. Desta forma problemas de estabilidade podem surgir impedindo a utilização da interferometria holográfica em ambientes industriais se estruturas de grandes dimensões forem objecto de estudo. Por exemplo, para estruturas do tamanho de um automóvel raramente é possível trabalhar numa configuração com isolamento completo da estrutura. A análise de uma tal estrutura implica que sejam utilizados *lasers* pulsados, de elevada energia, que permitem tempos de exposição muito curtos. Para além disso soluções salinas podem ser utilizadas nos registos para reduzir o tempo de exposição.

Quando se estudam objectos de menor dimensão, a medição pode ser realizada sobre mesas ópticas com isolamento onde o objecto e o interferómetro podem ser montados. Não é raro que estas medições sejam realizadas dentro de câmaras de perspex que isolam a montagem das correntes de convecção existentes.

A outra grande limitação da Interferometria Holográfica prende-se com a necessidade de uma revelação química da emulsão fotográfica e, no caso do tempo real, também com o seu preciso reposicionamento no sistema interferométrico (a tolerância de reposicionamento é de $\lambda/4$). A revelação química implica ainda uma câmara escura de revelação e uma experiência considerável da parte do operador no que diz respeito ao processamento do holograma.

Uma técnica alternativa ao processamento químico é a utilização de uma descarga electrostática de alta tensão num filme polimérico termo-sensível. A sua sensibilidade é, contudo, inferior e o campo de visão disponível bastante reduzido. Para além disso estes sistemas são bastante caros.

Uma limitação final da Interferometria Holográfica é o da localização das franjas. A informação de interesse é extraída qualitativamente do interferograma através de medições sobre as franjas obtidas sobre registos dos padrões. Este processo de medição é moroso e sujeito a erros de leitura.

Apesar de ainda existirem instalações industriais onde se utiliza a Interferometria Holográfica estas têm vindo progressivamente a ser substituídas por sistemas de Interferometria de *Speckle*. As múltiplas vantagens apresentadas por estes últimos fazem com que estes tenham vindo a substituir os sistemas de IH. A necessidade de utilizar um sistema óptico faz com que o ruído de *speckle* seja visível nos registos, implicando uma menor resolução. No entanto, o constante progresso verificado no desenvolvimento dos detectores CCD, actualmente já não é raro encontrar CCD's com pixels de dimensões de $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$, permite minorar esta desvantagem. É de esperar que num futuro mais ou menos próximo estejam disponíveis

no mercado matrizes fotossensíveis endereçáveis e renováveis com dimensões compatíveis com os registos holográficos de elevada resolução.

2.2.3 – INTERFEROMETRIA DE SPECKLE

Tal como a Interferometria Holográfica, a Interferometria de *Speckle* é uma técnica de medida sem contacto que pode ser utilizada para medir o deslocamento de pontos da superfície de um objecto difuso com uma precisão da ordem do comprimento de onda da radiação coerente usada na iluminação. No entanto, contrariamente à Interferometria Holográfica, esta técnica não se baseia na interferência coerente de frentes de onda emitidas por um mesmo objecto, mas na correlação das distribuições de intensidade de padrões de *speckle*.

Comparando os dois métodos, Interferometria Holográfica e Interferometria de *Speckle*, observa-se que a maior diferença advém do facto de, no segundo o *speckle* passar a ser visível. Contudo a opção pelo segundo método apresenta a enorme vantagem de permitir o registo electrónico dos padrões de interferência. Este facto permite reduzir significativamente as limitações da Interferometria Holográfica em aplicações fora do ambiente laboratorial.

Utilizando a Interferometria de *Speckle* com registo electrónico é possível dispôr de um conjunto de vantagens, tais como:

- Maior rapidez de registo;
- Registo electrónico/digital dos hologramas;
- Menor sensibilidade a vibrações externas (hologramas observados a 25 Hz);
- As configurações ópticas são mais simples e robustas;
- As instalações são mais simples (não é necessário laboratório fotográfico);
- Resultados quantitativos são possíveis (recorrendo a processamento de imagem);
- Possibilidade de construir sistemas simples e compactos e de fácil utilização para trabalhar em ambientes industriais.

A Interferometria de *Speckle* será aqui considerada como o termo geral que engloba as configurações ópticas que utilizam os padrões de *speckle* para codificar informação acerca da superfície de um objecto. Os primeiros registos de interferometria de *speckle* eram baseados em meios fotográficos mas foi com a introdução do registo em vídeo que estas técnicas adquiriram maior divulgação. Esta modificação do meio de registo, devido à sua menor resolução, implicou a alteração da configuração óptica base da Interferometria Holográfica. Com o aparecimento dos CCD's estas técnicas passaram exclusivamente a utilizar estes sensores para registo de informação. As técnicas de interferometria de *speckle* baseadas em CCD podem agrupar-se em:

- Holografia-TV (para medições de deslocamento no plano e fora do plano)
- *Shearography* (para medições de gradientes de deslocamento fora do plano).

Sendo estas duas técnicas baseadas no princípio do registo de padrões de *speckle* num sensor CCD, apenas se fará referência à Holografia-TV para descrever o processo de obtenção de informação holográfica num registo vídeo.

A Holografia-TV é uma técnica que utiliza um laser, uma câmara CCD e um sistema de processamento digital para criar hologramas à frequência vídeo (25 Hz). Vários nomes são actualmente utilizados para descrever este processo. O primeiro terá sido provavelmente *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI), designação dada por Butters and Leendertz em 1971. Mais recentemente novas designações apareceram ligadas a pequenos desvios da configuração original: *electronic holography*, *electro-optic holography*, ... A designação Holografia-TV, criada por Ellingsrud e Lokberg em 1989, será a utilizada nesta tese. Esta designação parece a mais adequada pois contém a referência ao registo em tempo-real e mantém a referência ao processo holográfico de base.

Requisitos em termos de resolução

Na Interferometria Holográfica, um meio de registo fotográfico é necessário porque a informação é obtida sob a forma de um padrão interferométrico de elevada frequência espacial. Uma placa holográfica típica, de 100mm x 125mm, tem uma capacidade de resolução superior a 3000 linhas/mm e contém cerca de 10^{10} bits de informação. Uma câmara de TV convencional, com um sensor CCD típico trabalha com 600 x 800 pixels e 8 bits de resolução. Cada imagem gravada pela câmara representa cerca de 10^6 bits de informação, várias ordens de grandeza inferior aos hologramas.

Assim, é claramente impossível substituir simplesmente a placa holográfica por uma câmara vídeo para se registarem hologramas. No entanto, uma configuração óptica, utilizando uma câmara vídeo, pode ser realizada para que o sistema registre informação sobre o estado da superfície de um objecto e permita o mesmo tipo de medição que a Interferometria Holográfica, mas à frequência vídeo. Passa-se então de registos em Interferometria Holográfica para registos em Interferometria de *Speckle*.

Numa configuração de Interferometria Holográfica o feixe de referência ilumina a placa holográfica com um ângulo de incidência elevado (ângulo com a normal ao plano). Desta forma separa-se espacialmente o feixe de referência da frente de onda que reconstrói a imagem do objecto. Se forem registados hologramas de objectos de maior tamanho o feixe de referência deveria ser deslocado para que não se sobreponha à observação do objecto durante a reconstrução do holograma. Contudo, à medida que a incidência *off-axis* do feixe de referência aumenta a estrutura do padrão interferométrico criado é ainda mais finamente espaçada e a resolução do meio de registo deve ser aumentada. A figura 2.23 representa o espaçamento de um padrão interferométrico produzido ao longo de uma frente de onda originada num ponto objecto, e a correspondente transformada de Fourier espacial.

Se o feixe de referência se posicionar no centro do objecto, durante a gravação, os requisitos de resolução do sistema de registo serão reduzidos ao mínimo. Esta configuração é, no entanto, de pouca utilidade uma vez que, na reconstrução, o objecto é indiscernível do feixe de reconstrução do holograma. Os primeiros hologramas de Gabor eram deste tipo. Foi o desenvolvimento dos hologramas *off-axis* de Leith e Upatneiks,

em 1962, que abriu caminho às técnicas de Interferometria Holográfica. Contudo a solução para gravar hologramas com uma câmara vídeo baseia-se na utilização do modo de operação de baixa resolução obtido através de um feixe de referência *on-axis*. Este modo de operação, conjugado com um filtro para remoção do termo contínuo ou uma operação de subtração por via electrónica que permite eliminar o sinal da reconstrução do holograma permite registar um holograma em meios de registo de baixa resolução.

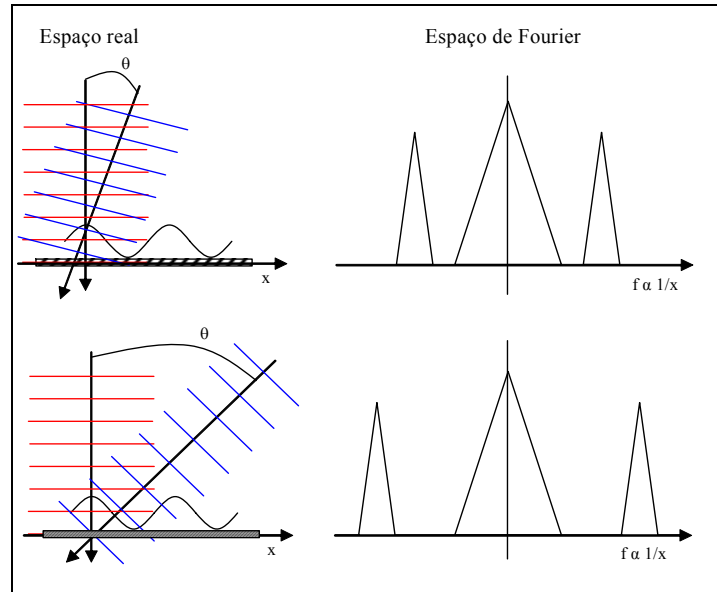


Figura 2.23 – Espectro do registo interferométrico para diferentes ângulos entre duas frentes de onda.

Os requisitos de resolução continuam, ainda assim, a ser demasiado elevados para um sistema baseado em sensores CCD (50 linhas/mm). Para aliviar ainda mais as exigências em termos de resolução o interferómetro é equipado com um sistema óptico formador de imagem sobre o plano de um fotodetector. Os requisitos de informação podem então ser reduzidos de 10^{10} bits para 10^6 bits. É a abertura numérica do sistema óptico que permite aumentar o tamanho do grão de *speckle* de forma a torná-lo compatível com o tamanho do pixel do detector de imagem (actualmente o CCD é o mais vulgar). A figura 2.24 apresenta um diagrama que sumariza estes aspectos.

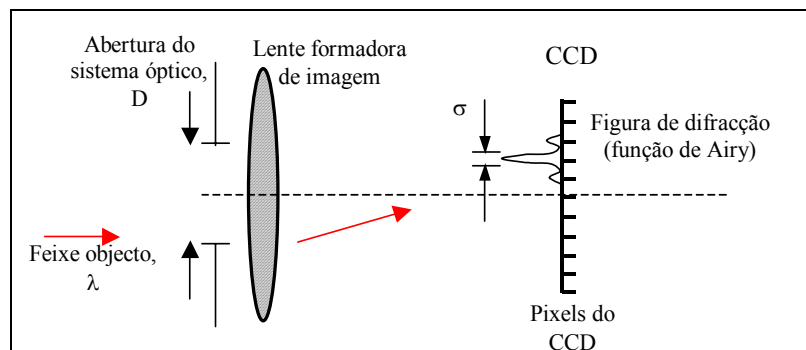


Figura 2.24 – Formação da figura de difracção de Airy devido a uma abertura finita no sistema óptico.

Efeito da abertura finita da lente

Os sistemas de Holografia-TV podem ser considerados como um conjunto de interferómetros de dois braços, cada um localizado num pixel. Para cada ponto do objecto visto pela lente, um padrão de difracção com um ponto central designado por disco de Airy forma-se no sensor. O disco de Airy é originado pela abertura finita da lente que forma a imagem. O padrão de difracção de todos os pontos do objecto combina-se coerentemente sobre o detector vídeo para dar origem a um padrão de *speckle* cujo tamanho é comparável aos discos de Airy individuais criados pela figura de difracção da abertura da lente. A intensidade de cada pixel depende da fase entre o feixe objecto e o feixe referência. A importância de uma referência alinhada com o eixo óptico pode então ser apreciada. Assim, se a incidência do feixe de referência no detector for oblíqua, alterações de fase ao longo de um pixel vão originar o que originará um conjunto de franjas ao longo de cada pixel (configuração utilizada para introduzir franjas portadoras nos padrões de *speckle*). Assim, uma variação global de fase entre os feixes de π radianos que deveria produzir uma grande variação do sinal do pixel irá gerar apenas uma ligeira variação. Numa escala sub-pixel, uma parte do pixel ficará mais brilhante e a outra mais escura. No entanto, o efeito global da integração do sinal é pouco visível. À medida que aumenta a inclinação entre os dois feixes a variação espacial da intensidade continua a diminuir. A modulação do sinal é então cada vez menor devido à diminuição da relação sinal/ruído. Para além disso, à medida que o ângulo aumenta as variações de intensidade serão tão reduzidas que a modulação do sinal não se faz correctamente. Atingem-se assim os limites da resolução espacial do meio de registo.

Uma forma de ultrapassar este problema consiste em utilizar registos em que o tamanho do elemento sensor seja tão reduzido que as variações de fase ao longo de um elemento são desprezáveis, como acontece na Interferometria Holográfica. As técnicas baseadas em CCD podem, em princípio, atingir valores de elementos sensores da ordem de metade do comprimento de onda da radiação, para que a modulação seja mensurável mesmo para ângulos elevados entre o feixe de referência e o sistema óptico, no entanto, a forma mais simples de resolver este problema é o de manter o ângulo entre os dois feixes inferior a 1° , sob pena de ser obtido um padrão de interferência cuja frequência espacial excede a largura de banda permitida pelo detector [28].

Estes factos são representados na figura 2.25 onde P é o tamanho do pixel, λ o comprimento de onda da radiação, θ o ângulo entre os dois feixes que interferem e $\Delta\phi$ a variação de fase ao longo de um pixel, devido apenas à inclinação do feixe de referência. Quer isto dizer que a modulação de fase devido à deformação do objecto deverá ser elevada para que a variação de fase ao longo do pixel seja desprezável.

Se o feixe de referência estiver inclinado de θ em relação ao eixo óptico, então, através do pixel P a fase vai variar de $\Delta\phi$. Para que este valor se mantenha reduzido deve ser tido em conta um ângulo entre as frentes de onda que interferem que satisfaça a relação [28]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} P \sin \theta < \frac{2\pi}{10} \quad (2.26)$$

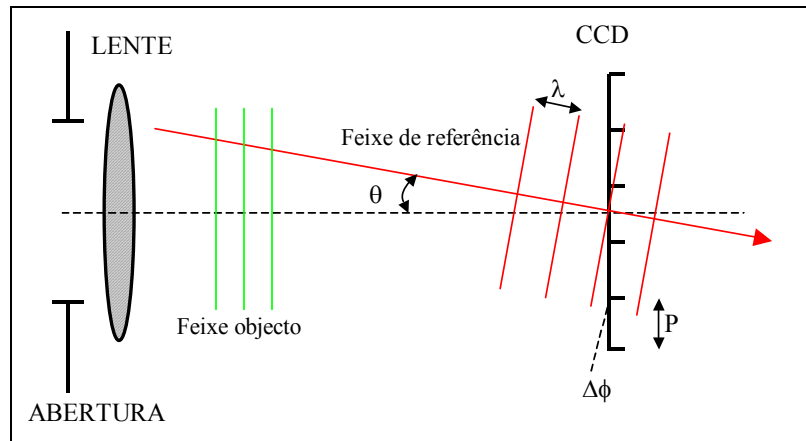


Figura 2.25 – Comparação da variação de fase do feixe de referência com o tamanho do pixel.

Assim para um CCD com um tamanho de pixel da ordem dos 7 mm, um ajuste angular da ordem dos 0.5° é necessário. Este valor é facilmente atingido com montagens ópticas de qualidade modesta. O valor de $2\pi/10$ é, assim, um valor de variação de fase que permite que o sistema óptico tenha uma boa sensibilidade aos deslocamentos da superfície em estudo.

Desta forma deverá ser controlado com rigor a geometria do interferómetro a utilizar numa montagem de Interferometria de *Speckle*. O alinhamento dos feixes representa a maior contribuição para a geração de um padrão de franjas compatível com a resolução do CCD. Contudo, a abertura numérica do sistema óptico representa também uma elevada contribuição para maximizar a modulação do sinal. Se o *speckle* for demasiado grande ou muito pequeno em comparação com o tamanho do pixel a modulação será reduzida.

Sinal registado no pixel

Do que atrás foi dito fica claro que cada pixel será responsável, num sistema bem ajustado, pela informação referente a um grão de *speckle*. Por sua vez, dada a sua natureza, um padrão de *speckle* é constituído por grãos cuja fase é independente entre si e varia aleatoriamente. São assim gerados os padrões de interferência primária onde fica registada a distribuição espacial da intensidade do padrão de *speckle* obtido da sobreposição da imagem da superfície com a frente de onda de referência. Este padrão é convertido numa matriz de intensidade pelo CCD e guardado numa memória digital de imagem.

Os padrões de interferência contendo a informação sobre a deformação da superfície do objecto são obtidos correlacionando padrões de *speckle* primários obtidos para diferentes estados do objecto. Estas franjas são designadas por secundárias e contêm a informação pretendida.

Embora estes padrões apresentem muito ruído de *speckle*, dada a ausência de modulação na maior parte dos grãos e a contribuição da fase aleatória, globalmente contribuem para o aparecimento de uma distribuição de franjas em tudo idêntica à distribuição obtida por Interferometria Holográfica.

O sinal obtido electronicamente após a correlação das duas distribuições de intensidade é um sinal de alta-frequência que contém a modulação devida à deformação do objecto. Uma filtragem passa-alto permite

eliminar o termo contínuo e melhorar o contraste dos padrões de franjas secundárias. Hoje em dia esta filtragem é substituída por uma correlação por subtração realizada em tempo-real pela maior parte das placas de imagem. A amostragem num monitor implica que todos os termos resultantes da subtração não sejam negativos. Esta limitação obriga a uma rectificação do sinal que pode ser obtida programando convenientemente as tabelas de conversão das placas de imagem actualmente disponíveis.

Formação de franjas por correlação de speckle

A teoria que se apresenta em seguida descreve a formação das franjas de interferência em sistemas de interferometria por correlação de *speckle*. Estes sistemas podem ser sensíveis a deslocamentos no plano, fora do plano ou a gradientes de deslocamento fora do plano.

Nesta descrição será considerada uma ampliação unitária das imagens, para maior simplicidade [29]. As frentes de onda que interferem, constituindo os interferogramas primários, são designadas por u_a e u_b . A distribuição de intensidade I detectado no plano de imagem é dada por:

$$I = |u_a + u_b|^2 = I_a + I_b + u_a u_b^* + u_a^* u_b. \quad (2.27)$$

onde $I_a = |u_a|^2$ é igual a I na ausência de u_b e $I_b = |u_b|^2$ é igual a I na ausência de u_a .

Introduzindo os índices 1 e 2 referentes, respectivamente, aos estados do objecto antes e após deformação e considerando os valores médios, o padrão de franjas de correlação média pode ser determinado através de:

$$\langle (I_a - I_b)^2 \rangle = \langle I_1^2 \rangle + \langle I_2^2 \rangle - 2 \langle I_1 I_2 \rangle. \quad (2.28)$$

Considerando que:

- u_a é de *speckle* e u_b pode sê-lo, também,
 - u_a e u_b são independentes,
 - $\langle I_{a1} \rangle = \langle I_{a2} \rangle = \langle I_a \rangle$ e o mesmo para b
- (2.29)

obtêm-se as seguintes equações:

$$\langle I_1 \rangle = \langle I_2 \rangle = \langle I_a \rangle + \langle I_b \rangle \quad (2.30)$$

$$\langle I_1^2 \rangle = \langle I_2^2 \rangle = \langle I_a^2 \rangle + \langle I_b^2 \rangle + 4 \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle \quad (2.31)$$

$$\langle I_1 I_2 \rangle = \langle I_{a1} I_{a2} \rangle + \langle I_{b1} I_{b2} \rangle + 2 \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle \Re \{ \langle u_{a1}^* u_{a2} \rangle \langle u_{b1}^* u_{b2} \rangle \}. \quad (2.32)$$

Para além disso, como a intensidade dos padrões de *speckle* obedece a uma estatística exponencial negativa, pode considerar-se que:

$$\langle I_a^2 \rangle = 2 \langle I_a \rangle^2. \quad (2.33)$$

Uma expressão semelhante pode ser deduzida para I_b se u_b for de *speckle*.

Assim, no caso de um padrão de interferência **perfeitamente correlacionado** (a mesma polarização, coerentes e com a mesma amplitude), o termo de interferência terá a seguinte forma:

$$\langle I_1 I_2 \rangle = \langle I_a^2 \rangle + \langle I_b^2 \rangle + 2 \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle \cos(\Delta\phi_b - \Delta\phi_a) \quad (2.34)$$

onde $\Delta\phi_a$ e $\Delta\phi_b$ são as diferenças de fase introduzidas nas frentes de onda u_a e u_b pelo carregamento do objecto e por eventuais modulações de fase.

O padrão de franjas de correlação médio pode ser descrito por:

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 4 \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle [1 - \cos(\Delta\phi_b - \Delta\phi_a)]. \quad (2.35)$$

Esta expressão descreve um padrão de franjas perfeitamente correlacionado de visibilidade unitária.

No caso de um padrão de franjas completamente descorrelacionado e em que u_a e u_b são de *speckle* e descorrelacionam sob acção da deformação, a equação (2.34) permite deduzir que:

$$\langle I_1 I_2 \rangle = (\langle I_a \rangle + \langle I_b \rangle)^2 = \langle I_a \rangle^2 + \langle I_b \rangle^2 + 2 \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle \quad (2.36)$$

O que conduz a

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 2 (\langle I_a \rangle + \langle I_b \rangle)^2 \quad (2.37)$$

Numa medição deverá evitar-se a completa descorrelação entre os padrões de *speckle* sob pena de se obter um padrão de franjas de visibilidade nula. Petterson [29] apresenta uma expressão que permite determinar o coeficiente de correlação, c , que é função do vector sensibilidade $\mathbf{k}_i$ e $\mathbf{k}_o$, do deslocamento $\mathbf{d}_o$, da rotação da superfície γ e da função pupila do sistema óptico $P(\mathbf{f})$. O valor de c situa-se entre 0 (descorrelação completa) e 1 (correlação total). Num padrão de *speckle* parcialmente descorrelacionado o termo de interferência toma a seguinte forma:

$$\langle I_1 I_2 \rangle = \langle I \rangle^2 \cdot (1 + |c|^2) \quad (2.38)$$

em que

$$c = \frac{1}{A} \int P(\mathbf{f}) \cdot P(\mathbf{f} - \mathbf{f}_t) \cdot \exp(-2\pi i \mathbf{f} \cdot \mathbf{d}_{o\perp}) \cdot d\mathbf{f}. \quad (2.39)$$

De acordo com o tipo de frentes de onda que interferem, uma de *speckle* e outra especular ou ambas de *speckle*, assim teremos um comportamento diferente para o interferómetro. Não só a informação gravada no padrão de franjas é diferente como também apresenta uma diferente sensibilidade à descorrelação. Pode então dividir-se os interferómetros de *speckle* em dois grupos:

- interferómetros em que apenas uma das frentes de onda é um padrão de *speckle*, sendo a outra obtida por reflexão especular. Esta última tem uma distribuição constante de fase.
- interferómetros em que ambas as frentes de onda são padrões de *speckle*.

No segundo grupo pode incluir-se o interferómetro com dupla iluminação para medir deslocamentos no plano, o interferómetro para medição de gradientes de deslocamento e um interferómetro para medição de deslocamentos fora do plano. Esta última configuração é pouco utilizada, pelo que não será abordada neste trabalho [30]. A medição deste tipo de deslocamentos é normalmente realizada por holografia-TV que consiste num interferómetro do primeiro tipo. De seguida apresenta-se o conjunto de equações que rege cada um dos interferómetros de *speckle* referidos.

A) Interferómetro sensível a deslocamentos fora do plano

Embora existam duas configurações para realizar este interferómetro apenas será aqui tratado o caso que envolve uma referência especular. Nesta situação apenas a frente de onda u_a descorrelaciona sob acção da deformação. A frente de onda u_b representa o braço de referência. Das equações anteriores pode verificar-se que:

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 2 \langle I_a \rangle^2 (1 - |c|^2) + 4 \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle - 4 |c| \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle \cos(\Delta\phi + \alpha + \phi_c) \quad (2.38)$$

onde

$$\Delta\phi = [(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_o) \cdot \mathbf{d}_o] \quad (2.39)$$

No caso dos vectores de onda da iluminação e de observação serem anti-paralelos ao longo do eixo óptico, a variação de fase induzida pela deformação é:

$$\Delta\phi = 2 \mathbf{k}_o \cdot \mathbf{d}_o = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) d_{oz} \quad (2.40)$$

Na figura 2.26 mostra-se esquematicamente um interferómetro deste tipo. Nesta montagem um divisor de feixe é utilizado para introduzir o feixe de referência no eixo do sistema formador de imagem. De referir que existem muitas soluções para a realização da referência que, neste caso, deverá estar perfeitamente alinhada com o eixo óptico do sistema. Das várias soluções propostas para o encaminhamento do feixe de referência, neste trabalho foi apenas utilizada a solução que recorre a uma fibra óptica monomodo colocada no centro da lente.

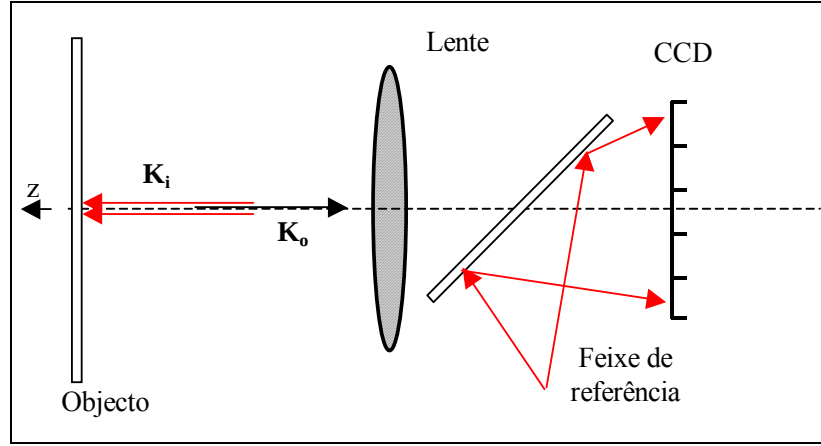


Figura 2.26 – Configuração de um interferômetro de *speckle* para medição de deslocamentos fora-do-plano.

B) Interferômetro sensível aos deslocamentos no-plano

Neste tipo de interferômetro, representado na figura 2.27, ambas as frentes de onda provêm do objecto e atravessam o sistema de formação de imagem. Consideremos que as duas frentes de onda são estocasticamente independentes. Sendo assim, as duas frentes de onda u_a e u_b são de *speckle* e descorrelacionam sob acção da deformação. Considerando que u_a e u_b descorrelacionam com o mesmo coeficiente, c , pode escrever-se que [29]:

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 2(1 - |c|^2) (\langle I_a \rangle + \langle I_b \rangle)^2 + 4|c|^2 \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle [1 - \cos(\Delta\phi + \alpha)] \quad (2.41)$$

onde

$$\Delta\phi = [(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_o) \cdot \mathbf{d}_o]_1 - [(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_o) \cdot \mathbf{d}_o]_2 \quad (2.42)$$

Este termo representa a diferença de fase devida à deformação ocorrida entre a gravação dos dois registos. O valor α na equação anterior representa uma fase constante introduzida propositadamente quando se pretende determinar a fase recorrendo a técnicas de modulação temporal.

Seguindo a formulação apresentada por Petterson [29], é possível obter, para um interferômetro de dupla iluminação, a seguinte equação para descrever o padrão de franjas:

$$\Delta\phi = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \sin(\theta) d_{ox} \quad (2.43)$$

Nesta equação θ é o ângulo entre cada uma das direcções de iluminação e a normal ao plano.

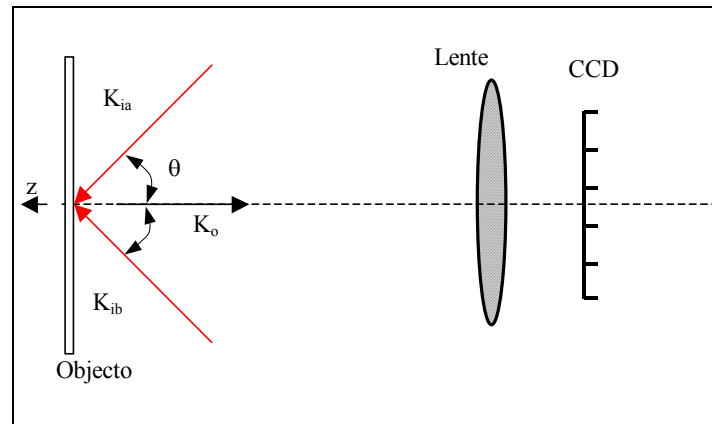


Figura 2.27 – Configuração de um interferómetro de *speckle* para medição de deslocamentos no-plano.

Com este tipo de interferómetro é possível medir os deslocamentos ocorridos no plano segundo a direcção do vector de sensibilidade. Este vector, por sua vez, está contido no plano definido pelos dois feixes de iluminação. Como durante a deformação do objecto ambas as frentes de onda sofrem descorrelação este interferómetro é o mais sensível a este problema. Contudo, a utilização de feixes colimados permite reduzir a sensibilidade à descorrelação na direcção perpendicular ao plano.

C) Interferómetro sensível a gradientes de deslocamentos fora-do-plano (*Shear*)

Nas técnicas anteriormente descritas, os dois braços do interferómetro percorrem caminhos distintos antes de se recombinarem. Alterações das condições ambientes como flutuações de temperatura, turbulências de ar ou vibrações poderão influenciar de forma distinta os percursos ópticos de cada um dos feixes. Assim, a diferença de fase entre o feixe objecto e o feixe de referência é influenciada não só pela deformação do objecto em estudo mas também pelas condições de teste. A *Shearography* é uma derivação destas técnicas que permite ultrapassar esta dificuldade, através de uma configuração interferométrica de caminhos ópticos comuns, ou diferencial.

Neste tipo de interferómetro a amplitude do feixe objecto é dividida em dois de forma a gerar um segundo feixe que será o feixe de referência. Posteriormente este é desviado (*sheared*) lateralmente em relação ao primeiro. Os feixes são recombinados em seguida e feitos incidir num plano detector. Na figura 2.28 está representada a configuração deste tipo de interferómetro: um feixe *laser* ilumina o objecto e cada par de pontos objecto dá origem a um ponto imagem no plano do detector. Este ponto imagem resulta, então, da interferência entre dois pontos objecto distintos.

A intensidade neste ponto é, por conseguinte, determinada pela intensidade da radiação proveniente de cada um dos pontos e pela diferença de caminhos ópticos. Como os dois feixes percorrem caminhos próximos, sendo a distância lateral máxima da ordem de alguns centímetros, as respectivas fases são perturbadas de forma semelhante pelas condições exteriores. Assim, a diferença de fase entre os dois feixes é pouco sensível a estas perturbações. De referir que os dois feixes podem ser considerados arbitrariamente feixe objecto e feixe de referência.

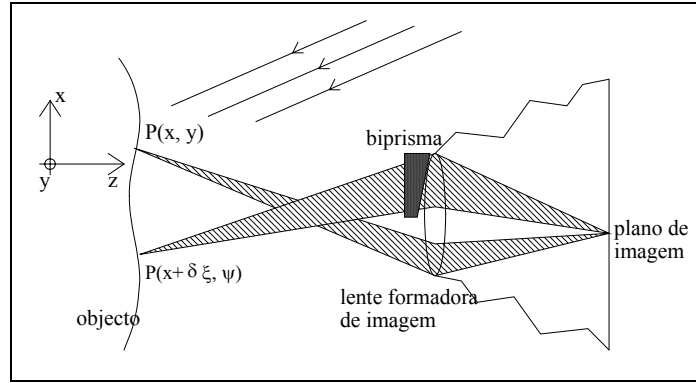


Figura 2.28 – Configuração de um interferômetro de *speckle* sensível ao gradiente de deslocamento fora-do-plano.

Apesar de existirem variações, sobretudo quanto à forma como o *shear* entre imagens é realizado, todos os sistemas de *shearography* são compostos de uma fonte de luz coerente, de um sistema interferométrico de *shear* de imagens e um detector de imagem (normalmente CCD) [31,32,33,34]. Tudo isto com o objectivo de criar num plano uma interferência resultante da sobreposição de raios difundidos por pares de pontos separados pela mesma distância (*Shear*).

Considere-se que as duas frentes de onda são estocasticamente independentes e que provém do objecto. Sendo assim, as duas frentes de onda u_a e u_b são de *speckle* e descorrelacionam sob acção da deformação.

Considerando que u_a e u_b descorrelacionam com o mesmo coeficiente, c , pode escrever-se que:

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 2(1 - |c|^2)(\langle I_a \rangle + \langle I_b \rangle)^2 + 4|c|^2 \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle [1 - \cos(\Delta\phi + \alpha)] \quad (2.44)$$

onde

$$\Delta\phi = [(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_o) \cdot \mathbf{d}_o]_1 - [(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_o) \cdot \mathbf{d}_o]_2 \quad (2.45)$$

No caso dos vectores de onda da iluminação e de observação serem anti-paralelos ao longo do eixo óptico e do *shear* entre imagens ser dado por Δx , a variação de fase induzida pela deformação é [35]:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} [d_{oz}(x + \Delta x, y) - d_{oz}(x, y)] \quad (2.46)$$

No caso de pequenos valores de *shear*, a equação anterior reduz-se a:

$$\Delta\phi = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \frac{\partial d_{oz}}{\partial x} \Delta x \quad (2.47)$$

Assim, um deslocamento de corpo rígido do objecto no-plano causará a descorrelação dos dois feixes, provocando uma variação de fase uniforme em todo o objecto, mas não originará franjas. Deslocamentos não uniformes e locais, induzindo variações não uniformes de fase, originarão franjas.

Na figura 2.29 representa-se esquematicamente uma das configurações mais utilizadas na realização deste tipo de interferómetro.

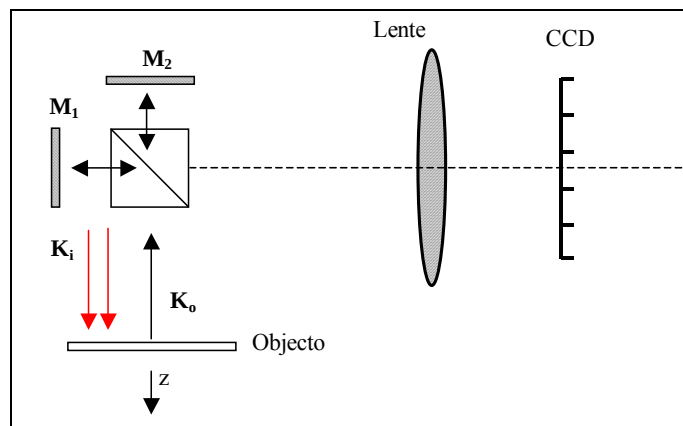


Figura 2.29 – Interferómetro de Michelson para medição de gradientes de deslocamento fora-do-plano.

Este interferómetro em que ambos os braços percorrem caminhos comuns em grande parte da sua extensão é menos sensível a instabilidades ambientais, razão pela qual esta montagem óptica é actualmente muito utilizada na construção de sistemas de detecção de defeitos para ser utilizada fora de ambientes laboratoriais.

Sistema de medida utilizando Interferometria de Speckle

De uma forma geral um sistema de medida deste tipo integra um interferómetro, uma fonte de radiação coerente e um sistema de aquisição e processamento de imagem. O interferómetro deverá ser seleccionado de acordo com o tipo de medição que se pretende realizar (ex. direcção do vector sensibilidade, amplitude e direcção dos deslocamentos esperados).

Os padrões interferométricos obtidos com o sistema são gravados por um detector de vídeo. Dadas as características dos detectores CCD este é, actualmente, o meio de gravação mais utilizado. O sinal electrónico obtido é enviado para um sistema digital de tratamento de imagem. As capacidades dos computadores actuais permitem utilizar placas de processamento de imagem montadas directamente nos seus barramentos. Nestas placas, o sinal vídeo analógico é convertido em digital e processado numericamente. No caso das câmaras CCD digitais a conversão A/D não é necessária.

Os interferogramas são normalmente mostrados em tempo-real num monitor integrado no sistema. Dado que a maior parte das placas de imagem actualmente disponíveis permite realizar a subtracção em tempo-real este é o método de correlação normalmente utilizado na obtenção dos padrões de franjas. Este método de correlação permite evitar a filtragem electrónica e conduz a padrões interferométricos de bom contraste.

A possibilidade de dispôr de sistemas de análise de imagem com elevado desempenho permite implementar algoritmos de cálculo de fase com os quais se podem realizar automaticamente medições quantitativas. Estes algoritmos implicam que o interferómetro disponha de elementos capazes de alterar, de forma controlada, a fase dos padrões de franjas independentemente da deformação do objecto.

Por último deve referir-se que a peça mais importante do sistema é a fonte de radiação coerente. Existem actualmente disponíveis vários tipos de laser o que permite seleccionar aquele que melhor se ajusta à função prevista para o sistema de medida. A título de exemplo, apresenta-se na figura 2.30 um sistema de medida por interferometria de *speckle* sensível a deslocamentos fora do plano.

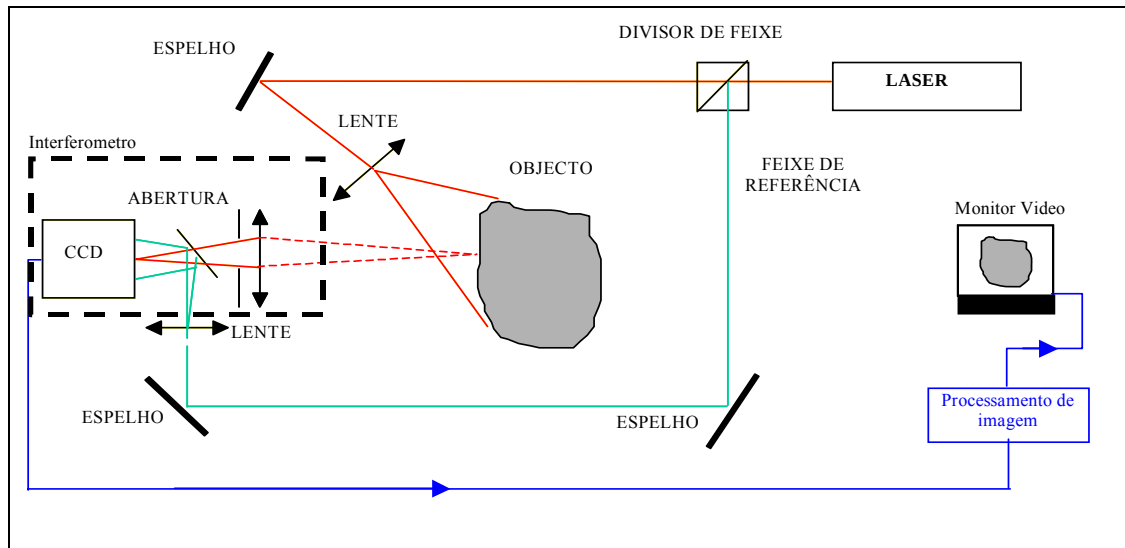


Figura 2.30 – Representação esquemática de uma montagem óptica para medição de deslocamentos fora-do-plano por Interferometria de *Speckle*.

Um sistema semelhante pode ser realizado de uma forma mais compacta recorrendo a fibras ópticas monomodo para guiar os feixes que interferem [36,37,38]. Os aspectos ligados à introdução de fibras ópticas neste tipo de interferómetros serão discutidos em detalhe no capítulo seguinte.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Einstein, *On the quantum theory of radiation*, Physikalische Zeitschrift, Vol. 18, 1917.
- [2] T. Mainman, *Stimulated optical radiation in ruby*, Nature, Vol.187, pág. 493-494, 1960.
- [3] A. Siegman, *Introduction to Masers and Lasers*, McGraw-Hill, 1971.
- [4] Frederick Reif, *Fundamentals of statistical and thermal physics*, McGraw-Hill 1987
- [5] A. Yariv, *Quantum electronics*, 2nd Ed., John Willey, 1975.
- [6] J. Wilson and J.F.B. Hawkes, *Laser principles and applications*, Prentice-Hall, 1989.
- [7] J. Wilson and J.F.B. Hawkes, *Opto-electronics, an introduction*, Prentice-Hall, 1989.
- [8] W. Koechner, *Solid state laser engineering*, Springer-Verlag, 1988.
- [9] M. Born and E. Wolf, *Principle of optics*, Pergamon, 1964.
- [10] E. Hecht and A. Zajac, *Óptica*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1992.
- [11] William V. Smith, *Laser applications*, Artech House, Inc Edit., 1970.
- [12] Max Schubert & Bernd Wilhelmi, *Non linear optics and quantum electronics*, John Wiley & Sons Ltd, 1986.
- [13] R.K. Erf, *Speckle metrology*, Academic Press, Inc., 1978.
- [14] J.C. Dainty, *Laser speckle and related phenomena*, Springer-Verlag, 1984.
- [15] M. Françon, *La granularité laser (speckle) et ses applications en optique*, Masson, 1978.
- [16] M. Vaz, "Interferometria laser e métodos híbridos em mecânica experimental", *Tese de Doutorado*, FEUP, 1995.
- [17] I. Newton., "Optics: or treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light", 3rd Ed. William & John Innys, London, 1721.
- [18] T. Young, "On the theory of light and colours", *Philos. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 91, Part 1, 1802.
- [19] D. Gabor, "A new microscopic principle", *Nature*, Vol. 161, pág. 777-778, 1948.
- [20] E. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects", *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 54, 1964.
- [21] R. Powell and K. Stetson, "Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction", *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 55, pág. 1593-1598, 1965.
- [22] K. Haines and B. Hildebrand, "Surface-deformation measurement using the wavefront reconstruction technique", *Applied Optics*, Vol. 5, 1966.
- [23] A. Luxmoore, "Holographic detection of cracks", *J. Strain Analysis*, Vol. 9, pág. 50-51, 1974.
- [24] D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wave-fronts", *Proc. Roy. Soc. A* 197, 454, 1949.
- [25] E.N. Leith and J. Upatnieks, "Reconstructed wave-fronts and communication theory", *Journal of the Opt. Soc. of America*, Vol. 52, pág. 1123-1130, 1962.
- [26] E.N. Leith and J. Upatnieks, "Wave-front reconstruction with continuous-tone objects", *Journal of the Opt. Soc. of America*, Vol. 53, pág. 1377-1381, 1963.
- [27] K.A. Stetson and R.L. Powell, "Interferometric hologram evaluation and real-time vibration analysis of diffuse objects", *Journal of the Opt. Soc. of America*, Vol. 55, pág. 1694-1695, 1965.

- [28] J.C. Davies and C.H. Buckberry, "Television Holography and its applications", *Optical methods in engineering metrology*, Ed. D.C. Williams, 1993.
- [29] M-Owner-Petersen, "Decorrelation and fringe visibility: on the limiting behavior of various electronic speckle-pattern correlation interferometers", *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 8, pag.1082-1089, July 1991.
- [30] G. Å. Slettemoen, "Electronic Speckle Pattern Interferometric System Based on a Speckle Reference Beam", *Applied Optics*, Vol. 19, pag. 616-623, 1980.
- [31] Y. Hung, R. Rowlands and I. Daniel, " Speckle-shearing interferometric technique: a full-field strain gauge", *Applied Optics*, Vol. 14, pag. 618-622, 1975.
- [32] Y. Hung & C. Taylor, "A tool for measurement of derivatives of surface displacement", *Proceedings of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, Vol. 41, pag. 169-175, 1973
- [33] J.A. Leendertz & J.N. Butters, "An image-shearing Speckle Pattern Interferometric Technique for measuring bending moments", *J. Physics E: Scien. Instr.* Vol. 6, pag. 1107-1110, 1973.
- [34] G. Pedrini, Y. Zou and H. Tiziani, "Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method", *Pure and Applied Optics*, Vol. 5, pag. 313-321, 1996.
- [35] M-Owner-Petersen, "Digital speckle pattern shearing interferometry: Limitations and prospects", *Applied Optics*, Vol. 30, pag. 2730-2738, July 1991.
- [36] A. Leite, "Optical fibre illuminators for holography", *Optics Communications*, Vol. 28, pag. 303-308, 1979.
- [37] J. Monteiro et al., "A miniaturized electronics speckle pattern interferometer", *Mechanics in Design Symposium* 96, Hamilton, Canada, 7-9 May 1996.
- [38] N. Fournier, "Développement de méthodes optiques pour la mesure de champs cinématiques sur des structures", *Tese de doutoramento*, Univ. St. Etienne, 1998.

CAPÍTULO 3

COMPONENTES DOS SISTEMAS INTERFEROMETRICOS

3.1 – Sistemas de iluminação laser	3.2
3.1.1 - Laser de Rubi	3.3
3.1.2 - Laser de Nd:YAG (10, 25 e 50 Hz)	3.7
3.1.3 – Iluminação laser e <i>beam-shaping</i>	3.18
3.1.4 – Fibras ópticas	3.22
3.2 – Detectores CCD	3.28
3.2.1 – MICAM	3.32
3.2.2 – SONY	3.37
3.2.3 – KODAK	3.38
3.2.4 – Operação de CCD de registo assíncrono com laser de impulsos	3.41
3.3 – Sistema de sincronização temporal, SST	3.43
Referências	3.47

O **capítulo 3** é dedicado ao estudo dos componentes dos sistemas interferométricos utilizados no âmbito desta tese. As fontes de luz, lasers de Rubi e Nd:YAG, são aqui analisadas em pormenor. Seguidamente, são descritas as propriedades principais das fibras ópticas e como estas podem ser utilizadas em sistemas de Interferometria de Speckle com o objectivo de realizar sistemas mais compactos e robustos. Este capítulo contém ainda um estudo sobre a forma de alterar o perfil gaussiano de emissão laser de forma a torná-la mais homogénea. As câmaras CCD MICAM, SONY e KODAK, usadas nos diferentes sistemas interferométricos, são caracterizadas. Por fim, é descrito o desenvolvimento do sistema electrónico de controlo de tempos usado para a sincronização do laser de impulsos ao sistema de aquisição vídeo.

3.1 – SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO LASER

Nos quase 40 anos que decorreram desde a primeira emissão *laser* verificou-se um desenvolvimento extremamente rápido desta tecnologia. A tecnologia *laser* continua a ser um campo extremamente dinâmico onde as novidades laboratoriais do passado recente são rapidamente incorporadas na produção. Esta dinâmica não será por certo interrompida a curto prazo. Já se fizeram reflectir feixes *laser* na Lua para medir a distância Terra - Lua; a soldadura por *laser* pode ser utilizada para realizar micro-soldaduras em retinas com descolamento; o *laser* já foi utilizado na fusão de neutrões, na estimulação do crescimento de sementes, como canal de comunicação, como guia para máquinas ferramentas, navios, transmissão de dados, na levitação de pequenos objectos, na **medição precisa de deslocamentos**,...e ainda hoje as novas aplicações dos *lasers* continuam a ser fonte de surpresa.

É sobre esta última aplicação, a medição de precisa de deslocamentos por Interferometria *Laser*, que iremos focar a nossa atenção ao longo desta tese. Para este tipo de aplicações, somente *lasers* com características espectrais adequadas à interferência de frentes de onda complexas podem ser utilizados. Durante esta tese 2 tipos de *lasers* foram utilizados: Rubi e Nd:YAG. Apesar da maior parte dos *lasers* desenvolvidos nos anos sessenta ter desaparecido ou ter sido transformada de tal forma que pouco têm a ver com os seus predecessores, os *lasers* de Rubi continuaram a ser utilizados para gerar impulsos de 694.3 nm de comprimento de onda até aos nossos dias. Actualmente os *lasers* de Nd:YAG substituíram os *lasers* de Rubi como *lasers* de impulso multi-uso, no entanto, estes últimos encontraram e mantêm o seu campo de trabalho específico.

Nos próximos parágrafos a construção e os modos de funcionamento de cada um desses lasers são detalhados bem como a sua utilização como fontes de luz nos processos de Interferometria.

3.1.1 - LASER DE RUBI

O *laser* de Rubi foi o primeiro a ser desenvolvido. Este feito foi realizado pela equipa de T. Mainman, em 1960 [1]. A figura 3.1 representa esquematicamente a sua configuração inicial, juntamente com uma imagem do sistema de bombeamento. A sua capacidade para gerar impulsos de elevada energia e coerência a partir de um sistema compacto também torna este *laser* atractivo para a Interferometria Holográfica e de *Speckle*. Neste caso, o *laser* de Rubi continua a ser frequentemente utilizado pelo facto de fornecer uma radiação dentro do espectro visível, ao contrário da maioria dos *lasers* de estado sólido com quatro níveis cuja emissão se situa na região do infravermelho. Ora, os foto-detectores e as emulsões fotográficas são muito mais sensíveis ao comprimento de onda do *laser* de Rubi do que a radiações no infravermelho.

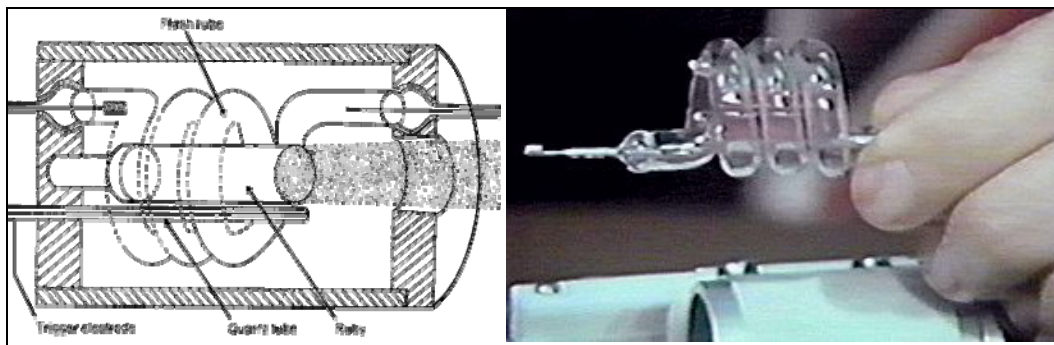


Figura 3.1 – Esquema interno do primeiro laser e sistema de bombeamento.

Os sistemas *laser* de Rubi têm, no entanto, algumas limitações importantes. Sendo um *laser* de três níveis é inerentemente menos eficaz que os sistemas *laser* de quatro níveis, como os baseados em cristais de Nd:YAG. Este modo de operação implica a existência de potências de bombagem elevadas porque mais de metade dos átomos do estado fundamental devem ser excitados para o nível *laser* mais elevado. Só desta forma é possível produzir uma inversão de população. Isto implica um nível de *threshold* elevado e a uma baixa eficiência do sistema. A eficiência do sistema é definida como sendo a razão entre a potência óptica produzida e a potência eléctrica necessária para o alimentar [2].

O meio activo num laser de Rubi é um cristal sintético de safira (Al_2O_3) dopado com cerca de 0.01%-0.5% de crómio. Os átomos de crómio, responsáveis pela emissão de luz, substituem o alumínio, que tem a mesma valência (3^+), colorindo o cristal de vermelho ou cor-de-rosa. Uma descrição detalhada do processo de realização da emissão estimulada em lasers de Rubi pode ser encontrada em A. Siegman [3].

Um *laser* de Rubi moderno incorpora os mesmos elementos básicos que Mainman utilizou no seu *laser* embora com algumas variações. Mainman prateou os extremos do cristal de Rubi e os *lasers* actuais têm espelhos separados, um totalmente reflector e outro parcialmente. Os espelhos são geralmente planos ou suavemente côncavos para compensar a curvatura do cristal por efeito térmico. Nesta configuração forma-se uma cavidade ressonante estável. Os *lasers* de Rubi funcionam bem na configuração *oscilador-amplificador*, que permite produzir impulsos de elevada energia com feixes de melhor qualidade que sistemas integrando apenas um oscilador bombeado mais intensamente.

Mainman colocou o seu cristal de Rubi dentro de uma lâmpada de *flash* helicoidal e o conjunto dentro de um cilindro metálico. Os sistemas modernos são bombeados por lâmpadas de *flash* lineares em cavidades elípticas, tal como os lasers de Nd:YAG. Com adaptações ao nível das ópticas os *lasers* de Rubi podem funcionar nas mesmas cavidades que os de Nd:YAG, contudo a mais baixas taxas de repetição. O bombeamento com lâmpadas de *flash* é necessário porque não existem díodos *laser* que funcionem nas frequências de emissão do Rubi. Esta característica tem limitado a possibilidade de conceber sistemas de Rubi mais compactos e eficientes.

Como este *laser* exige um forte bombeamento do meio activo, parte da energia utilizada não é dissipada e mantém-se no cristal sob a forma de calor. Este facto limita a taxa de repetição dos impulsos a poucos Hz. Esta poderá ser aumentada se forem utilizados cristais de menor dimensão com maior poder de dissipação de calor. Embora sistemas de baixa energia possam ser arrefecidos a ar, o arrefecimento a água é o mais utilizado. Existem sistemas de arrefecimento primário, utilizando água destilada que flui através da cavidade de acoplamento em torno do cristal e das lâmpadas de *flash* e sistemas de arrefecimento secundário, utilizando *chillers* ou água da rede.

Esta taxa de repetição faz com que o tempo de vida do estado mais elevado seja de cerca de 3 ms, o que lhe dá uma elevada capacidade de armazenamento de energia. Um único cristal de Rubi armazena varias vezes mais energia que um cristal de Nd:YAG do mesmo tamanho e gera impulsos de maior potência. Este elevado tempo permite também extrair 2 ou mais impulsos de um único ciclo de *flash*. Pedrini et al apresentou um sistema de Interferometria de *Speckle*, baseado neste tipo de *laser*, com capacidade para produzir 4 impulsos em cada ciclo de *flash* [4].

Geração de impulsos

Os osciladores de Rubi podem produzir impulsos com energias entre 50 e 100 J, embora possam ser alcançadas energias superiores em configuração oscilador-amplificador. Contudo, estas energias são atingidas com o *laser* operando em múltiplos modos transversais. O modo TEM₀₀, o único de interesse nos processos de Interferometria de *Speckle*, é bastante mais fraco e implica a montagem de elementos adicionais no interior da cavidade – *etalons* e *pinholes*.

Os *lasers* de Rubi são utilizados geralmente no modo de funcionamento de *Q-switching* nas técnicas de Interferometria Holográfica e de *Speckle*. O processo de *Q-switching* limita os impulsos de um oscilador a

energias de alguns Joule. Comprimindo a largura do impulso para valores entre 10-35 ns podem atingir-se picos de potência de 100 MW.

O laser de Rubi pode ser operado em modo *single-pulse* ou em modo *double-pulse*. A figura 3.2 representa esquematicamente as duas formas de obtenção de energia a partir de um laser de Rubi. O funcionamento em *single-pulse* é possível mas a uma frequência constante de cerca de 4 Hz, frequência de *flash* das lâmpadas de bombeamento. Operado neste modo tem pouco interesse para as aplicações da Interferometria de *Speckle* ao estudo de fenômenos dinâmicos.

Pelo contrário, o modo de funcionamento em *double-pulse* é o mais frequente. Desta forma é possível obter dois impulsos com características espectrais idênticas num espaço de tempo reduzido e num único ciclo de *flash*. Este modo de funcionamento cria um forte esvaziamento dos níveis atômicos superiores de tal forma que os próximos ciclos de *flash* não conseguem gerar a inversão de população necessária à emissão estimulada.

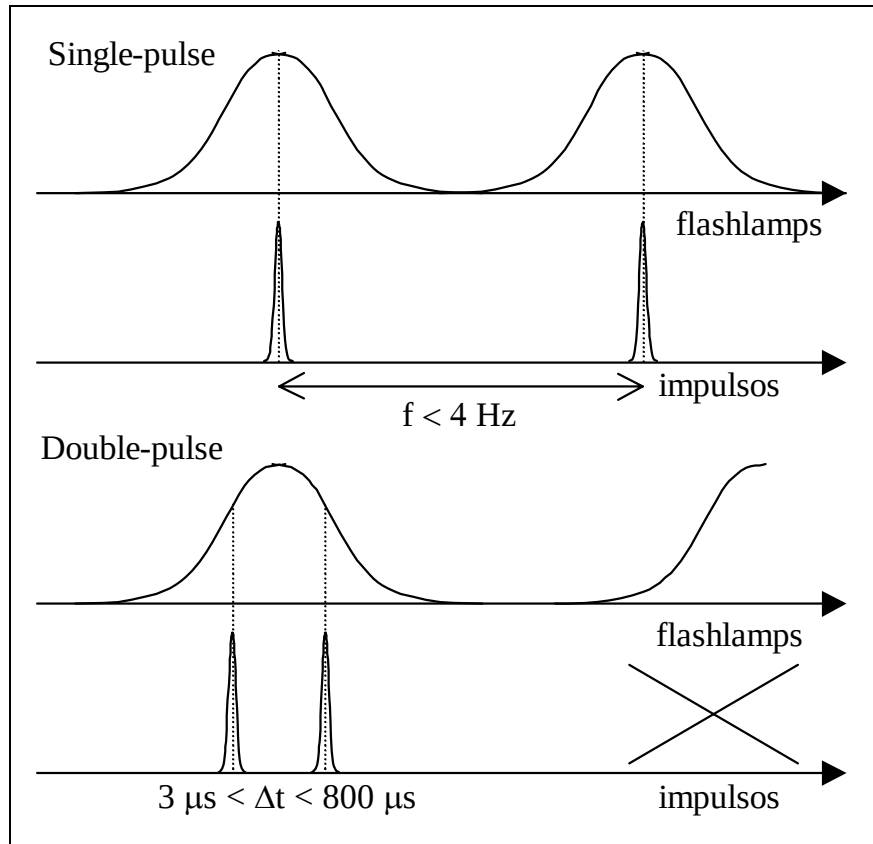


Figura 3.2 – Formas de obtenção de impulsos laser a partir de um sistema de Rubi.

Laser LUMONICS-HSL2 Model

Durante esta tese foi utilizado um sistema laser de Rubi LUMONICS-HSL2. Este sistema, disponibilizado pela empresa HOLO3 para validar algumas das configurações ópticas apresentadas nos capítulos 6 e 7, está representado na figura 3.3. Este laser é capaz de gerar impulsos com 1 J e pode ser operado em *single-pulse*

ou *double-pulse*. Na figura é também visível a fonte de alimentação de grandes dimensões e o sistema electrónico de controlo temporal situado no topo desta.

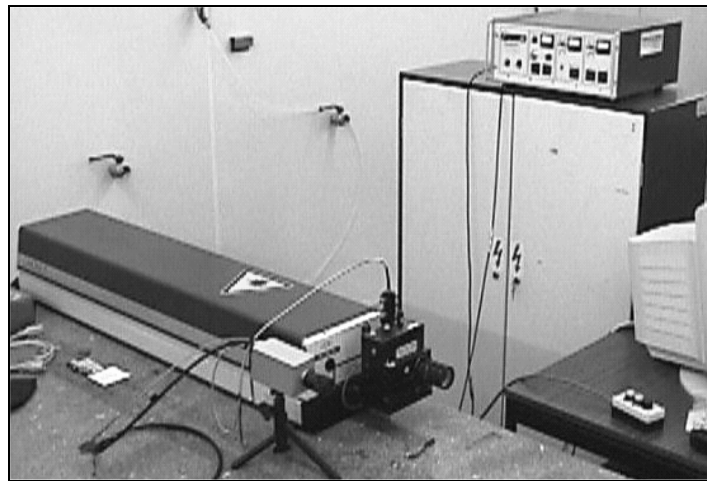


Figura 3.3 – Laser de Rubi de 1 J com a fonte de alimentação

Na tabela que se segue, figura 3.4, estão representados diversos atrasos entre sinais para diferentes intervalos de tempo entre impulsos. A construção desta tabela permite ajustar correctamente o tempo de carga do banco de condensadores das lâmpadas de *flash* para que os pares de impulsos gerados pelo sistema laser tenham a maior energia possível. Esta variação do intervalo entre impulsos é necessária ao estudo de fenómenos dinâmicos, pois permite:

- em fenómenos transientes que possam ser repetidos, acompanhar a evolução do fenómeno no tempo;
- no caso de fenómenos harmónicos, ajustar o tempo de registo à frequência do evento.

Laser de Rubi, LUMONICS-HLS2					
Caixa de Controlo	Atraso (μ s)	Atraso (μ s)	Atraso (μ s)	Atraso (μ s)	Atraso (μ s)
Atraso pretendido entre impulsos	10	100	200	400	800
Atraso entre impulsos medido no osciloscópio	1145	1047	952	850	761
Ajuste do banco de condensadores	1150	1050	950	850	760

Figura 3.4 – Conjunto de atrasos entre impulsos e ajustes temporais de carga dos condensadores.

Hoje em dia são poucas as empresas que se dedicam à fabricação deste tipo de *laser*. O fabricante mais conhecido, INNOLAS, UK, continua a produzir *lasers* em tudo semelhantes ao apresentado na figura, fabricado há mais de dez anos. O aparecimento dos sistemas de Holografia-TV pulsada com capacidade de

cálculo de fase veio abrir novos mercados para este tipo de *laser* tendo a INNOLAS apresentado recentemente uma versão mais compacta de um sistema *laser* de Rubi.

3.1.2 - LASER DE Nd:YAG

As principais limitações na utilização do *laser* de Rubi em Interferometria de *Speckle* são a sua baixa eficiência e taxa de repetição. Esta última característica restringiu fortemente a utilização do registo electrónico dos padrões de interferência enquanto não foi possível dispor de câmaras CCD com registo assíncrono. Foi então necessário encontrar um outro meio *laser* capaz de produzir impulsos a frequências compatíveis com o registo vídeo. O *laser* de Nd:YAG permite não só a emissão contínua mas também a emissão pulsada a frequências que vão desde alguns Hz até dezenas de KHz [5].

O *laser* de Nd:YAG, tal como o de Rubi, pertence ao grupo dos *lasers* em que o meio activo, geralmente cristalino, é intencionalmente alterado -dopado- durante a fase de crescimento do cristal. Este tipo de *laser* é robusto, de fácil manutenção e capaz de gerar picos de potência elevados. O meio activo do Nd:YAG é a granada de Ítrio e Alumínio (**Y**trium **A**luminium **G**arnet), $Y_3Al_5O_{12}$, com um ião metálico de *terra rara*, Neodímio, Nd^{3+} como dopante.

Uma descrição detalhada do processo de realização da emissão estimulada em *lasers* de Nd:YAG pode ser encontrada em W. Koechner [6]. Deve referir-se, no entanto, que este é um *laser* de quatro níveis, pois o nível de chegada está suficientemente afastado do estado fundamental que a sua população em condições PTN é muito reduzida.

O bombeamento do meio activo é geralmente realizado através da utilização de *flashes* intensos de luz branca provenientes de lâmpadas de Xénon. A existência de diferentes transições de bombeamento contribui para o aumento de eficiência da mesma quando se utiliza radiação de largo espectro. Para aumentar ainda mais esta eficiência o tubo de *flash* é colocado o mais próximo possível do cristal. A forma geralmente utilizada para aumentar este acoplamento óptico é colocando dentro de uma cavidade elíptica de reflectividade elevada o tubo de *flash* linear e o meio activo.

Uma grande quantidade de calor é dissipada pelo tubo de *flash* e por conseguinte o cristal do meio activo aquece rapidamente. Para evitar danos materiais e para que o *laser* tenha uma taxa de repetição aceitável, o arrefecimento da cavidade é necessário. Este arrefecimento pode ser realizado através de ar forçado ou nos sistemas de maior potência através de circuitos de arrefecimento a água. Se uma quantidade suficiente de calor for retirada do sistema o *laser* pode mesmo funcionar continuamente, se para isso substituirmos as lâmpadas *flash* de xénon por lâmpadas de halogéneo.

Analizando a variação da energia acumulada no cristal de Nd:YAG verifica-se que por cada ciclo de *flash* é possível gerar dois impulsos separados por um intervalo de tempo que pode variar entre 20 e 400 μs . Esta banda de operação é menos ajustada às aplicações de metrologia óptica que a do *laser* de Rubi (3 a 820 μs).

Se no limite inferior a separação entre impulsos é bastante maior que o mínimo permitido pelo Rubi, no limite superior a separação entre impulsos é bastante menor. O duplo impulso pode, contudo, ser usado em aplicações de Interferometria de *Speckle* [6]. No entanto, a sua aplicação à medição de fenómenos rápidos é pouco frequente. Isto porque sempre que se gera um impulso o cristal sofre deformação, por isso, um segundo impulso laser muito próximo do primeiro terá características espectrais algo diferentes do impulso inicial.

Para poder medir fenómenos dinâmicos é geralmente necessária uma banda de operação mais alargada. Dado que a acumulação de energia neste cristal não se mantém durante tanto tempo como para o *laser* de Rubi é necessário recorrer a sistemas duplos para realização de um sistema de medida. Estes sistemas são constituídos por dois *lasers* independentes, com as mesmas características e operados em conjunto. Quando é necessária coerência entre dois impulsos gerados independentemente, um terceiro *laser* deverá ser usado para estimular simultaneamente e com a mesma frequência as duas cavidades. Um *laser* de Nd:YAG de base tem um comprimento de coerência reduzido, da ordem de alguns centímetros. Este terceiro *laser*, designado por *Seeder*, é normalmente um díodo *laser* operado numa configuração que lhe garante uma grande estabilidade com reduzida largura de banda e lhe permite aumentar o comprimento de coerência do sistema *laser* cerca de 100 vezes [7].

Configuração NY 81-50 DUAL

A utilização de *lasers* de impulsos, quer de Rubi quer de Nd:YAG, em aplicações de análise de fenómenos dinâmicos de estruturas tem sido limitada pela fraca versatilidade de programação dos intervalos de tempo entre impulsos, dificuldades de sincronização e baixa frequência de repetição de pares de impulsos, em particular nos *lasers* de Rubi. Estes factores, aliados ao facto dos sistemas de Rubi não serem adequados para operar com registo electrónico em vídeo convencional, fizeram com que houvesse uma diminuição significativa na fabricação destes sistemas. O *laser* de Nd:YAG apareceu, assim, como alternativa aos sistemas de Rubi, embora com as limitações associadas à sua banda de utilização.

Quando o LOME decidiu optar pelas técnicas de Interferometria de *Speckle* pulsadas o *laser* de Nd:YAG apresentava-se como sendo a melhor solução para estas aplicações e era também aquele, que na altura, apresentava maior potencial de desenvolvimento.

O sistema que foi adquirido pelo LOME, em versão cliente, foi seleccionado de forma a minorar as limitações deste tipo de *laser* em termos de controlo de impulsos.

Trata-se de um *laser* CONTINUUM, modelo NY 81-50 DUAL, que é constituído por duas cavidades ópticas ressonantes e os respectivos amplificadores totalmente independentes para permitir maior versatilidade na programação do tempo entre impulsos consecutivos. Tratando-se de um *laser* que é operado em frequência fixa é também possível utilizá-lo com CCD's de registo assíncrono desde que se disponha de um *shutter* que permita bloquear o feixe com a necessária rapidez. No caso presente é utilizado um *shutter* electromagnético que permite programar o número de impulsos do *laser* necessários à análise do comportamento dinâmico da estrutura em estudo.

O alinhamento dos dois feixes originados pelas duas cavidades distintas é realizado por um divisor de feixe dieléctrico associado a lâminas $\lambda/4$ e $\lambda/2$ de forma a garantir a polarização vertical da radiação *laser* de ambos os impulsos.

A figura 3.5 apresenta o esquema da configuração actual do sistema *laser* em utilização no LOME. Para melhorar a estabilidade da radiação, quer entre impulsos, originados pela mesma cavidade, quer de pares de impulsos originados pelas diferentes cavidades, o *laser* de Nd:YAG apresenta um sistema de injeção de radiação, *SEEDER*, que excita as cavidades ressonantes quando estão abertos os respectivos *Q-Switch* das cavidades. Sempre que as cavidades estão sintonizadas para a mesma frequência do *SEEDER* o sinal emitido por este satura o ganho do meio provocando uma diminuição da largura do impulso e maior estabilidade na frequência da radiação emitida, de que resulta uma diminuição do ruído da emissão da cavidade e o consequente aumento de comprimento de coerência, que passa de alguns centímetros para cerca de 1 metro. Este sistema associado a duas lâminas de $\lambda/4$ do comprimento de onda, colocadas nas duas extremidades do cristal, melhora ainda a frente de onda da radiação emitida, importante para a Interferometria Holográfica e de *Speckle*, dado que diminui as ondas estacionárias no interior da cavidade e por sua vez os modos de propagação da cavidade.

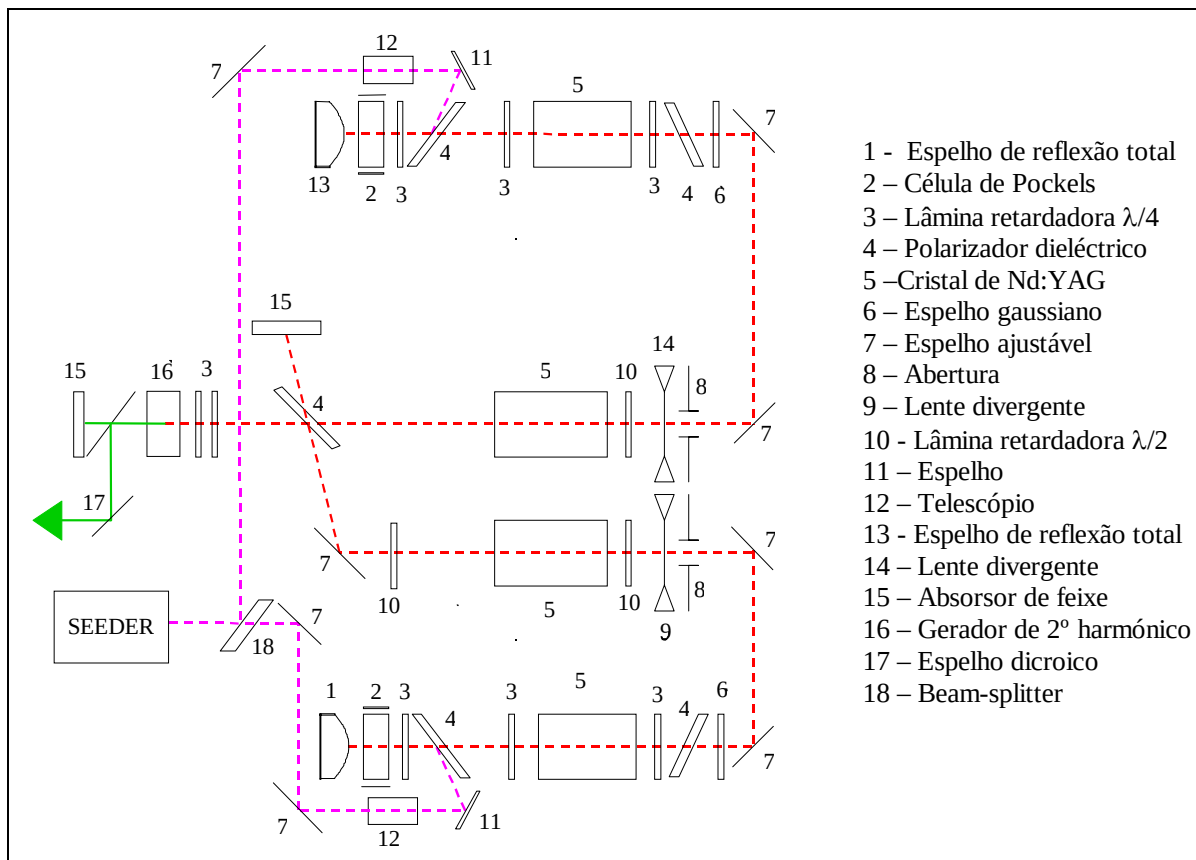


Figura 3.5 – Esquema detalhado do sistema *Laser* NY 81-50 DUAL existente no LOME

Este sistema dispõe de um par de amplificadores que permite aumentar a energia por impulso para 180 mJ sem ser necessário recorrer a um excessivo bombeamento do cristal de Nd:YAG.

Embora seja um sistema dual operando em regime *master-slave* em que o oscilador 2 é o *master*, é possível operar as células de *Pockel* independentemente do ciclo de *flash*. Desta forma pode o sistema ser ajustado para que ambos os impulsos sejam extraídos quando as cavidades apresentam o Q máximo.

A figura 3.6 apresenta uma vista interior do sistema completo. Nela pode ser visto o *Laser Seeder* (1) bem como todo o seu sistema electrónico de controlo (2). É através da consola deste sistema de controlo que dão entrada os sinais de sincronismo entre os *laser master* e *slave* do sistema. As cavidades ressonantes *master* (3) e *slave* (4) são também observadas. A radiação *Seeder* que é injectada em cada uma destas cavidades permite a criação de um impulso de cerca de 50 mJ@1064 nm. Este pode ainda ser amplificado ao passar pelas cavidades amplificadoras (5) e (6). Na figura pode ainda ser observada a localização do cristal gerador do 2º harmónico (GSH). Como a emissão *laser* natural do cristal de Nd:YAG se faz a 1064 nm, a utilização de um cristal não linear permite duplicar a frequência de emissão gerando um feixe visível com o comprimento de onda de 532 nm.

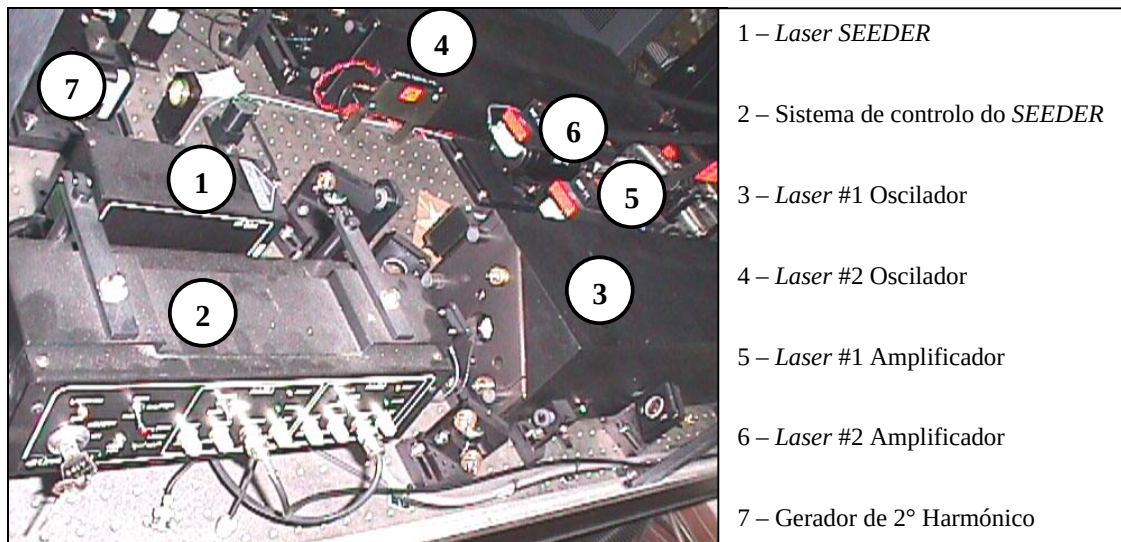


Figura 3.6 – Vista de todo o sistema laser que inclui 5 cavidades ressonantes.

A figura 3.7 permite observar com maior detalhe o sistema de GSH. Os dois feixes gerados por cada uma das cavidades são combinados e enviados, com a mesma direcção, para o cristal de geração do 2º harmónico.

Este, como tem um funcionamento que depende da orientação dos seus eixos ópticos, pois é um cristal birrefringente, pode ser ajustado em termos de direcção por intermédio de um conjunto parafuso roda tangente até que se atinja a condição de adaptação dos índices.

A condição de adaptação dos índices é conseguida, no cristal de KDP existente no *laser*, para uma inclinação de 50° em relação à direcção de polarização do feixe. A polarização da onda refractada final é uma polarização elíptica muito próxima da linear, num plano cuja inclinação está próxima dos 45°. Desta forma,

qualquer tipo de polarização à entrada conduz sempre a uma polarização próxima da linear e segundo a direcção de 45° [8].

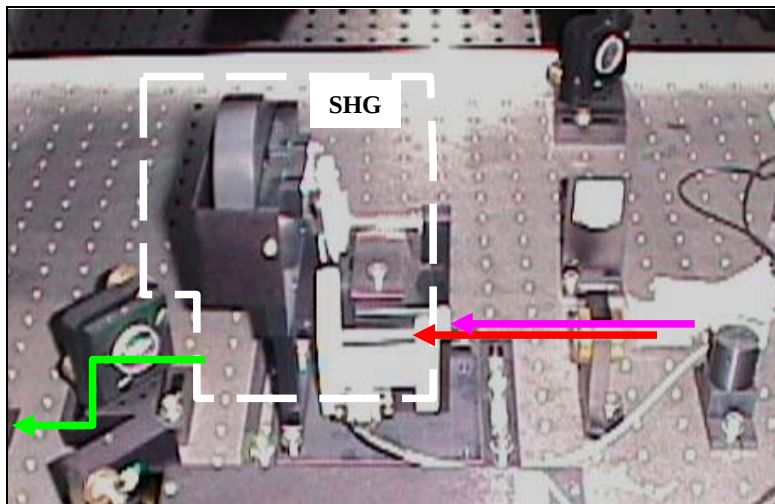


Figura 3.7 – Gerador de Segundo Harmónico.

Descreve-se em seguida o funcionamento do sistema *laser Seeder* e a sua importância na geração de impulsos capazes de serem utilizados em sistemas de Interferometria de *Speckle*, ou seja, coerentes, e com uma estabilidade espacial e temporal elevadas.

Sistema de Injecção Seeder

O processo de injecção *Seeder* refere-se à capacidade de obtenção de funcionamento num único modo longitudinal (*single mode*) de um *laser* pulsado através da injecção no interior da cavidade (*seeding*) de radiação de uma grande pureza espectral durante o intervalo de tempo em que o *Q-switch* abre. Para que este processo de injecção seja eficiente é necessário que a emissão do *Seeder* (proveniente de um *laser*) seja várias ordens de grandeza mais intensa do que qualquer outra emissão espontânea também presente na cavidade *laser* pulsada.

Quando a frequência do *laser Seeder* estiver dentro da largura de banda de um modo da cavidade um impulso *Q-switch* desenvolver-se-á mais rapidamente a partir desta emissão *seeded* do que através de outra qualquer emissão espontânea. Consequentemente, o impulso que se desenvolve a partir do sinal *seed* satura o ganho do meio activo e extrai a energia (baixando o ganho) antes do impulso que tente desenvolver-se por emissão espontânea. Desta forma toda a energia armazenada dentro do meio activo é consumida pelo impulso que se desenvolveu a partir da emissão *seeded*, resultando numa emissão de saída do *laser* pulsado em *single-frequency*.

O meio activo *laser* utilizado neste sistema *Seeder* é um anel ressonante unidireccional, bombeado por um *laser* díodo e monolítico designado por MISER (*Monolithic, Isolated, Single-mode, End-pumped Ring*). As características essenciais do MISER são a incorporação numa estrutura monolítica de uma lâmina

retardadora de meio comprimento de onda, de uma rotação de Faraday e de um polarizador, como se representa na figura 3.8. A combinação dos efeitos destes 3 elementos ópticos é o de fornecer menores perdas numa direcção para uma volta no ressonador em anel. Isto força o anel ressonante a emitir a radiação *laser* numa única direcção. No anel ressonante existe então uma onda progressiva ao contrário das cavidades ressonantes convencionais onde existem ondas estacionárias. Este tipo de ressonador não sofre, portanto, dos efeitos de *hole-burning* e emite apenas num único modo longitudinal. Estamos então na presença de uma cavidade com um funcionamento próximo do de um amplificador.

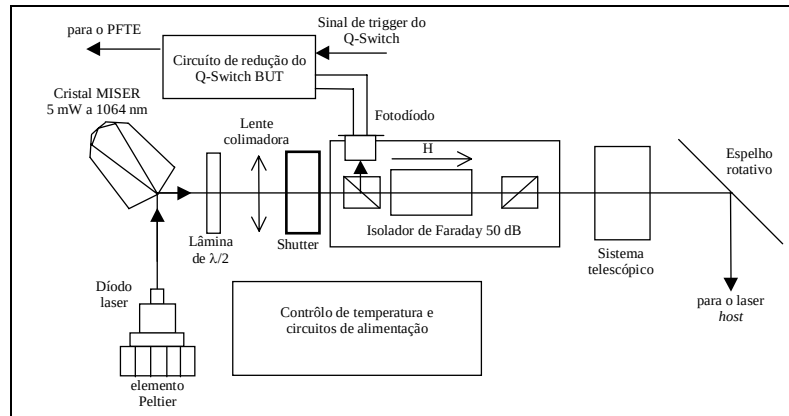


Figura 3.8 – Diagrama de blocos do sistema de injeção *Seeder* [9].

No sistema dual o feixe proveniente do MISER, ou *ring laser*, é dividido em dois e orientado de forma a percorrerem a mesma distância em ambos os percursos até atingirem o interior das duas cavidades. Estas, por sua vez, são constantemente monitorizadas e possuem um espelho móvel controlado de forma a garantir que o comprimento da cavidade ressonante se mantém constante.

Estes dois factores contribuem para que este sistema *dual* veja o seu comprimento de coerência aumentado de 1 cm para cerca de 1 m e produza pares de impulsos, que embora provenientes de cavidades distintas, interferem entre si.

Em seguida descrevem-se dois modos de geração de impulsos obtidos sem e com a utilização do *Seeder*.

Q-switch Build Up Time: Unseeded operation

O *Q-switch* está incluído na cavidade ressonante para inicialmente impedir a emissão *laser* durante a emissão das lâmpadas de *flash* por um período de tempo da ordem de 250 μ s (o tempo de vida do nível superior do Nd:YAG). Isto garante que o cristal de Nd:YAG na cavidade ressonante armazene a maior quantidade de energia possível. Após este tempo de armazenamento de energia se completar o *Q-switch* abre. Qualquer luz na cavidade que possua a frequência adequada (i.é., uma frequência dentro da largura de banda de ganho do Nd:YAG e ressonante com um modo longitudinal da cavidade) e se propague no eixo da cavidade é amplificada pelo meio activo do cristal de Nd:YAG. Se a emissão for *unseeded*, esta luz inicial na cavidade é, na sua maior parte, ruído de largo espectro de emissões espontâneas do oscilador Nd:YAG. As

características espectrais desta emissão são dadas pela curva de ganho fluorescente do Nd:YAG. Esta emissão, relativamente fraca radia em todas as direcções deixando apenas disponível no eixo uma potência da ordem dos nW disponível para a amplificação na cavidade.

Assim, à medida que o *Q-switch* abre, esta fraca emissão espontânea tem de fazer um nº suficiente de voltas à cavidade para atingir um nível comparável às características de saturação de intensidade do Nd:YAG. Com uma taxa de ganho superior a 50 por cada passagem no meio activo, e tendo em conta as perdas por acoplamento de saída, o desenvolvimento de um impulso requer geralmente 12 voltas à cavidade ressonante. Considerando uma cavidade com um comprimento de 60 cm, o tempo de desenvolvimento de um impulso (***Build-Up Time***) é de cerca de 45 ns:

$$BUT = \frac{n \cdot 2 \cdot l}{c} \quad (3.1)$$

Quando a emissão espontânea amplificada atinge o nível de saturação. Energia suficiente é retirada ao cristal de Nd:YAG, baixando o ganho. Nesta altura o impulso laser é emitido pela cavidade. A largura do impulso corresponde ao número de voltas que os fotões circulantes demoram a extrair a energia armazenada no cristal de Nd:YAG. Assim o comprimento de coerência de uma emissão *unseeded* é de cerca de 1 cm. O tempo durante o qual a emissão espontânea é amplificada até atingir a saturação é designado por *Q-switch BUT*.

Q-switch BUT: Seeded operation

Durante o funcionamento *Seeded* uma emissão laser de largura espectral muito estreita ($\Delta\nu < 10$ KHz) e de potência superior a 1 mW é dirigida axialmente para o interior da cavidade laser. Se esta emissão *Seed* estiver próxima da frequência de um modo longitudinal da cavidade laser esta será amplificada quando o *Q-switch* abrir. Como a emissão *Seed* é cerca de 6 ordens de grandeza superior às emissões espontâneas, o impulso *Q-switch* desenvolve-se mais cedo a partir da emissão *Seed* do que a partir da emissão espontânea. Para além disso, quando a emissão *Seed* amplificada atinge o nível de saturação de intensidade, o ganho no cristal oscilador é rapidamente reduzida. Esta redução no ganho inibe a amplificação de emissões espontâneas mantendo-as num nível baixo se comparadas com o impulso de saída *Seeded*. A diferença de tempos entre quando o impulso *Q-switch* é emitido *Seeded* VS *Unseeded* designa-se por *Q-switch BUT reduction* (QSBUTR).

Como regra pode dizer-se que se a redução no *Q-switch Build up time* é superior à largura total do impulso haverá pelo menos 1000 vezes mais energia no modo longitudinal *Seeded* do que em qualquer outro modo longitudinal.

A figura 3.9 mostra que fora da operação *seeder* existe uma sobreposição de modos que provoca um impulso instável e que demora mais tempo a desenvolver-se do que um impulso que se forma a partir de radiação *Seed*. Quer isto dizer que o impulso será mais estreito, com uma largura de banda muito mais

reduzida, o que equivale a um aumento do comprimento de coerência de cerca de 100 vezes. A emissão *Seeded* tem um comprimento de coerência de cerca de 1 m.

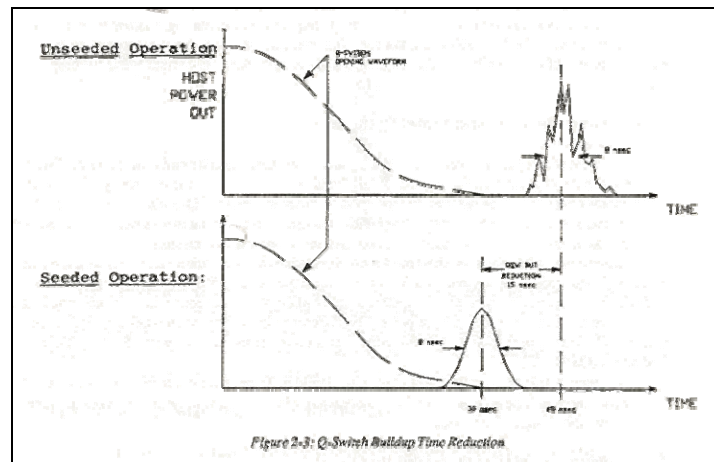


Figura 3.9 – Emissão de um impulso em funcionamento *Unseeded* e *Seeded* [9].

O que acaba de ser dito pode também ser verificado através dos anéis de interferência produzidos por um interferómetro de Fabry-Perot. Nestes anéis observa-se uma grande instabilidade quando a emissão *Seeded* não existe e uma grande estabilidade quando ela existe. A figura 3.10 representa uma figura de interferência obtida por um interferómetro de Fabry-Perot quando nele incide luz proveniente de uma cavidade laser com *Seeder*.

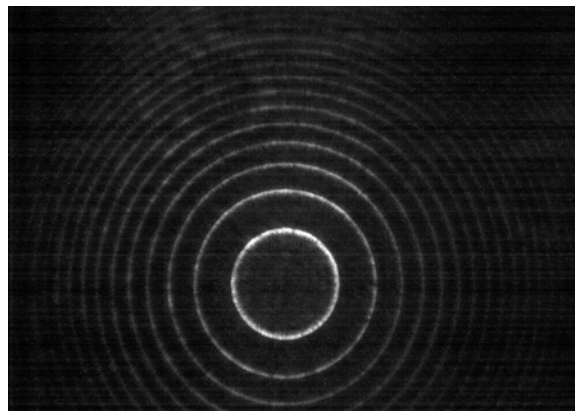


Figura 3.10 – Anéis de interferência originados por uma emissão *Seeded* no interior da cavidade.

Controlo de frequência do *Seeded* host laser

Como as cavidades *Seed* e *Host* são entidades independentes uma forma de controlo e estabilização de frequência é necessária. A forma *standard* de o conseguir é através da precisa estabilização da frequência de saída do *Seeder*. A sobreposição de frequências é depois alcançada através do controlo activo do comprimento da cavidade *Host*. Na prática o espelho de elevada reflectividade da cavidade *Host* é

transladado mecanicamente através de um *Piezoelectric Frequency Tuning Element* (PFTE). Utilizando um PFTE num circuito de realimentação existe a possibilidade de manter a frequência do modo da cavidade *Host* à frequência do *Seeder*. A estabilização da temperatura da água de arrefecimento interna fornece um meio adicional, mais lento, de controlar a frequência no laser *Host*. Após se conseguir uma sobreposição grosseira através da estabilização da água de arrefecimento, uma forma de controlar o PFTE deve ser realizada. O controlo do PFTE para que o *Q-switch BUT* seja minimizado é a forma correcta de se conseguir uma sobreposição precisa da frequência com a frequência do *Seeder*. A figura 3.11 apresenta o *Q-switch BUT* à medida que a frequência do laser *seed* é varrida ao longo da curva de ganho da cavidade *host*. A imagem expandida mostra que à medida que o PFTE se desloca numa direcção qualquer da posição exacta de sobreposição óptima de frequência, o efeito do *Q-switch BUT* é idêntico.

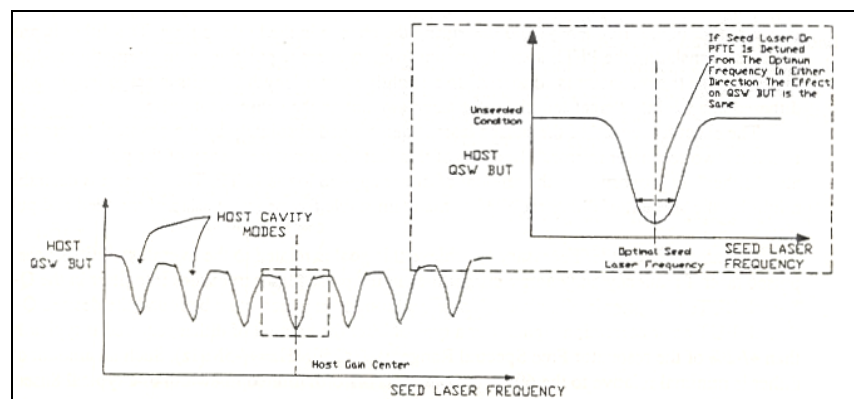


Figura 3.11 – O sinal de *Q-switch BUT* em função da frequência da radiação *Seeder* [9].

O sistema de controlo do laser *dual* utiliza este sinal para monitorizar as cavidades. O comprimento é controlado em anel fechado no sentido de minorar o BUT e desta forma garantir emissão coerente para ambos os osciladores.

Controlo do sistema laser Dual

O sistema *laser* pode ser controlado através de um teclado que actuando sobre um processador permite seleccionar as principais funções e activar os programas disponíveis. Em memória existe um conjunto de programas destinados às utilizações mais frequentes. No entanto, o operador dispõe da possibilidade de criar e guardar os seus programas sempre que os disponíveis não sejam os mais adequados. O controlo pode ainda ser realizado por ligação a um PC exterior através de uma porta RS232.

Estas formas de controlo permitem actuar sobre a frequência de repetição e o atraso da abertura da célula de Pockels relativamente ao disparo do *flash*. Em funcionamento *single-pulse*, apenas para teste do sistema, é também possível carregar os condensadores dos *flashes* e efectuar um disparo de ambas as cavidades. Por questões de segurança está também acessível a possibilidade de, através de *shutters*, bloquear ambas as cavidades.

O controlo do tempo entre impulsos é realizado por acção sobre dois potenciómetros controlados externamente. Num deles é possível obter atrasos entre 0 e 5 μ s, enquanto um outro permite atrasos desde 0 a 1 ms.

Após o ajuste do intervalo entre impulsos compete ao operador ajustar os tempos de arranque dos *flashes* da cavidade *slave* para que a abertura da célula de Pockel se dê no máximo de energia do ciclo de *flash*. Esta operação deve ser automatizada para uma mais fácil operação do sistema. Na figura 3.12 representa-se o cronograma de operação do sistema NY 81-50 DUAL.

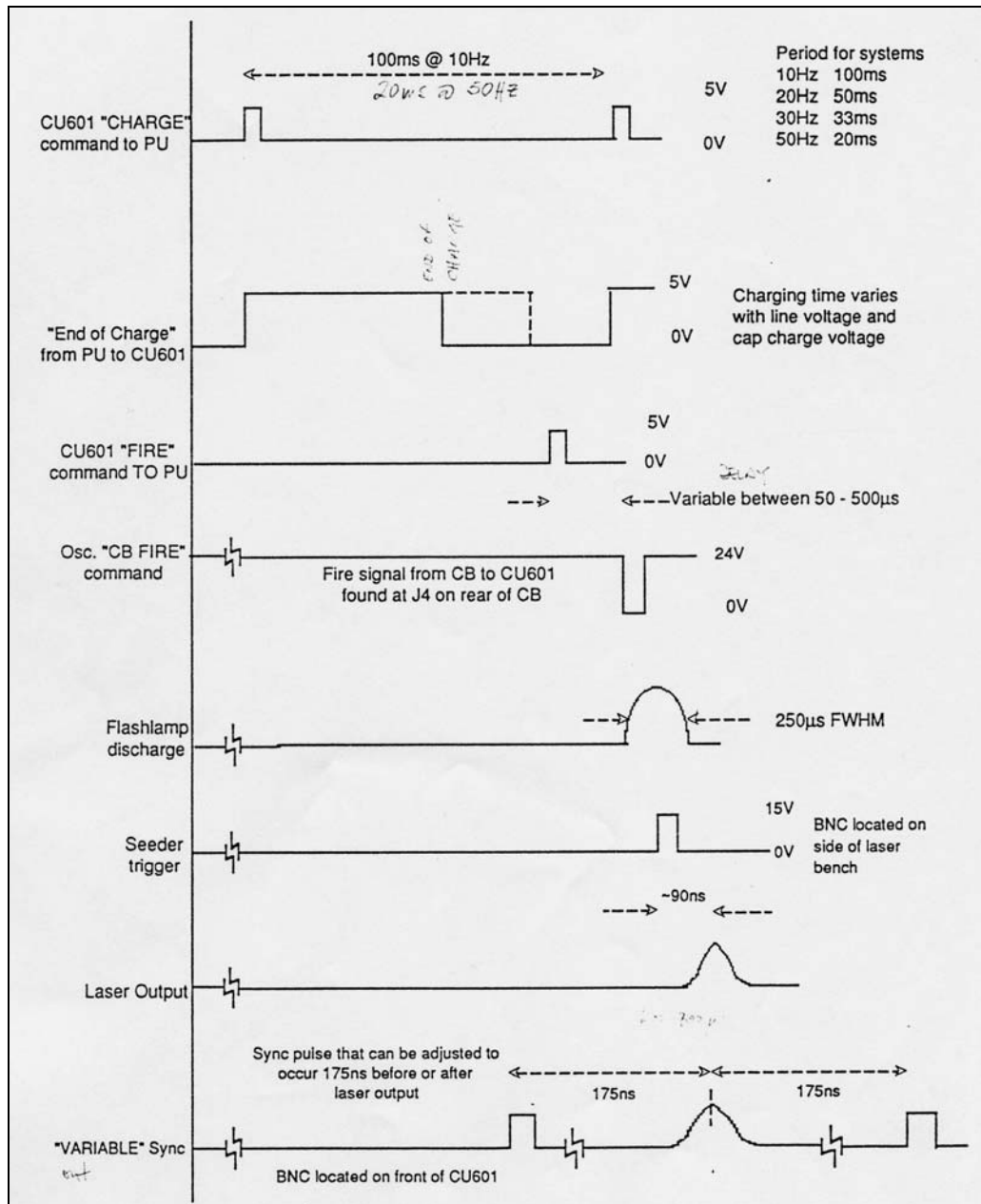


Figura 3.12 – Diagrama temporal do controlo dos impulsos laser do sistema NY 81-50 DUAL.

O primeiro sinal representado corresponde ao arranque de um ciclo do sistema e dá ordem de carga aos condensadores. Este sinal é gerado pelo *clock* do sistema e parte do oscilador *master*. O segundo sinal é a resposta dos condensadores indicando o fim de carga. Um atraso elevado deste sinal implica a paragem do sistema com a mensagem EOC failure (*End of charge failure*). Após a recepção deste sinal o sistema está pronto a funcionar. É em seguida gerado o sinal de disparo (*fire*) que provoca a descarga dos condensadores sobre as lâmpadas de *flash*. Por último é gerado o sinal de disparo das células de Pockel sendo a separação entre estes sinais passível de variação através da actuação sobre os potenciómetros exteriores cujo atraso se adiciona ao sinal de sincronismo da célula de Pockel do oscilador *slave*.

Os sinais enviados pela unidade de controlo para o *Seeder* e para o sistema de controlo da cavidade não são aqui descritos por serem interiores ao sistema e não ter sido necessário actuar sobre eles. Como se pode ver trata-se de um sistema difícil de operar dada a elevada quantidade de sinais de sincronismo e as várias possibilidades de lhe adicionar atrasos. Só uma boa compreensão do modo de funcionamento e a experiência adquirida permitiram operar este sistema de forma controlada.

Na tabela que se segue, figura 3.13, estão representados atrasos entre sinais para os diferentes intervalos de tempo entre impulsos utilizados pelo autor. Esta variação do intervalo entre impulsos é necessária ao estudo de fenómenos dinâmicos pois permite:

- no caso de fenómenos transientes, que estes possam ser repetidos e assim acompanhar a evolução do fenómeno no tempo
- no caso de fenómenos harmónicos de ajustar o tempo de registo à frequência do evento.

Laser de Impulsos Nd:YAG modelo NY-80 Continuum												
Caixa de Controlo	Atraso (μs)	Tensão (KV)	Atraso (μs)	Tensão (KV)	Atraso (μs)	Tensão (KV)	Atraso (μs)	Tensão (KV)	Atraso (μs)	Tensão (KV)	Atraso (μs)	Tensão (KV)
CU601	39		115		98		160		208		391	
Osciloscópio	17		100		80		150		200		400	
PU OSC #1	106	1,375	150	1,375	145	1,4	175		192		283	
PU AMP #1												
PU OSC #2		1,3		1,33		1,4		1,4		1,4		1,4
PU AMP #2	100	1,285	100	1,285	100	1,29	100	1,29	100	1,29	100	1,29
CB OSC #1	167		200		200		200		200		200	
CB AMP #1	200		200		200		200		200		200	
CB OSC #2	270		305		305		305		305		305	
CB AMP #2	90		90		90		90		90		90	

Figura 3.13 – Conjunto de atrasos entre impulsos e respectivos ajustes temporais e eléctricos de carga dos condensadores.

Configuração do laser Nd:YAG da HOLO3 e PSA

Durante esta tese dois outros sistemas laser Nd:YAG foram estudados. Um, propriedade da empresa HOLO3, que funciona com uma taxa de repetição de 25 Hz e é utilizado sobretudo em CineHolografia – gravação de hologramas a 25Hz [10]. Este sistema laser é em tudo semelhante ao sistema adquirido pelo LOME, diferindo apenas na taxa de repetição que é inferior. De referir que o sistema LOME pode funcionar a 25 Hz, se para isso se alterar a frequência de abertura das células de Pockels.

Este sistema, no entanto, não foi utilizado durante a estadia do autor na HOLO3 devido a problemas de incompatibilidade com o sistema de Holografia-TV (câmara CCD)

O sistema laser de Nd:YAG do grupo PSA, é um sistema mais compacto que os outros dois referidos apesar de ser também um laser de dupla cavidade com *Seeder*. O facto de ser um laser mais recente e que funciona a uma taxa de repetição inferior aos outros dois, 10 Hz, permite uma arquitectura mais compacta.

O laser é um Spectra-Physics Quanta Ray: CGR130. A energia por cavidade é de cerca de 150mJ @ 532 nm. A separação entre impulsos pode ser ajustada entre 5 µs e 50 ms. O sistema de bombeamento é por lâmpadas de *flash*. Este laser foi utilizado como fonte de radiação coerente nos ensaios de validação do sistema de Holografia-TV pulsada realizados nas instalações da PSA-Belchamp em França, sobre um automóvel Peugeot 206 [11]. Os detalhes destes ensaios são apresentados no capítulo 6.

3.1.3 – ILUMINAÇÃO LASER E BEAM-SHAPING

A utilização de uma iluminação *laser* implica sempre uma frente de onda cuja intensidade não é uniforme. Contudo, para a sua utilização em sistemas de Interferometria de *Speckle* é desejável que toda a área a inspecionar possua a mesma iluminação. A uniformidade do feixe de iluminação é fácil de obter quando se utiliza uma fonte de luz não coerente, como é o caso da luz branca ordinária. Quando se recorre a uma fonte de luz coerente fica-se dependente do modo de funcionamento do *laser*, o qual condiciona a forma da frente de onda. Conforme o modo transversal em que o *laser* é operado assim se obterão diferentes distribuições de energia na frente de onda.

As distribuições de intensidade dos campos electromagnéticos encontradas nos *lasers* multimodo são definidas como modos Transversais do campo electromagnético (TEM_{nm}) e descritas através de funções Hermite-Gaussianas – modos [12].

Os modos são descritos por uma família de funções caracterizadas por:

$$h_{mn}(m,n) = H_n \left(\sqrt{2} \frac{x}{w} \right) H_m \left(\sqrt{2} \frac{y}{w} \right) \exp \left(-i k \frac{x^2 + y^2}{2 q} \right) , (m,n) \in N^2, \quad (3.2)$$

e os polinómios de Hermite são definidos por,

$$H_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} (e^{-x^2}). \quad (3.3)$$

Particularizando para as primeiras ordens do polinómio obtém-se:

$$\begin{aligned} H_0(x) &= 1 \\ H_1(x) &= 2x \\ H_2(x) &= 4x^2 - 2 \\ &\dots \end{aligned} \quad (3.4)$$

Utilizando estes polinómios pode simular-se a distribuição de energia electromagnética pelos diferentes modos de oscilação transversal do laser. Os resultados de uma tal simulação são apresentados na figura 3.14..

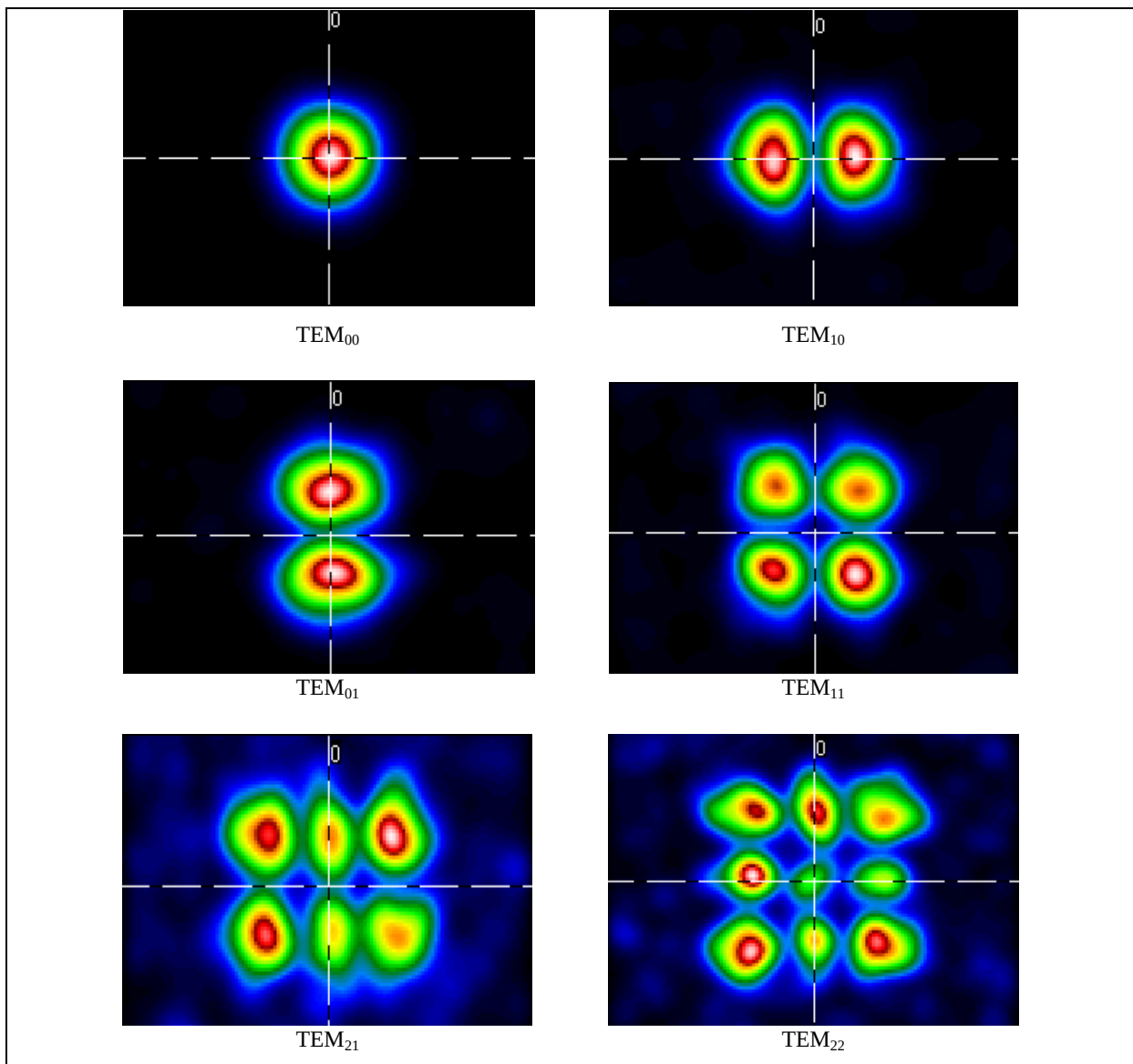


Figura 3.14 – Distribuição de energia na frente de onda de uma emissão laser nos modos TEM de ordem mais baixa.

A simulação realizada fez uso do módulo de propagação laser disponível no software SOLSTIS® da empresa OPTIS. Para isso têm-se em conta os valores de divergência do feixe, a largura do feixe no colo, o comprimento de onda e a posição no eixo do plano de medida. Pode observar-se que para a ordem 0, h_{00} , temos uma forma modal gaussiana enquanto que para ordens mais elevadas os polinómios de Hermite exercem a sua influência alterando de forma radical a forma de onda, criando lóbulos, e anulando-se na origem [12].

Como se pode observar através das imagens obtidas por simulação uma forma de obter um *laser* a funcionar no modo transversal fundamental consiste em diminuir o tamanho dos espelhos da cavidade para que os modos de ordem mais elevada tenham um ganho inferior às perdas, pois estes modos têm a sua energia menos concentrada ao longo do eixo óptico da cavidade. Na prática este efeito é obtido através da inclusão de um *pinhole* no eixo da cavidade.

Como as medições que se pretendem efectuar são obtidas através de padrões de interferência de *speckle* não são admissíveis modos de funcionamento que conduzam a frentes de onda com padrões de intensidade que não sejam contínuos. Os campos electromagnéticos cuja distribuição de energia é Gaussiana são a forma de feixe usada e é observada na forma do modo transversal de um *laser* TEM_{00} . Este modo de funcionamento elimina as zonas de intensidade nula e conduz a uma frente de onda, como se representa na figura 3.15.

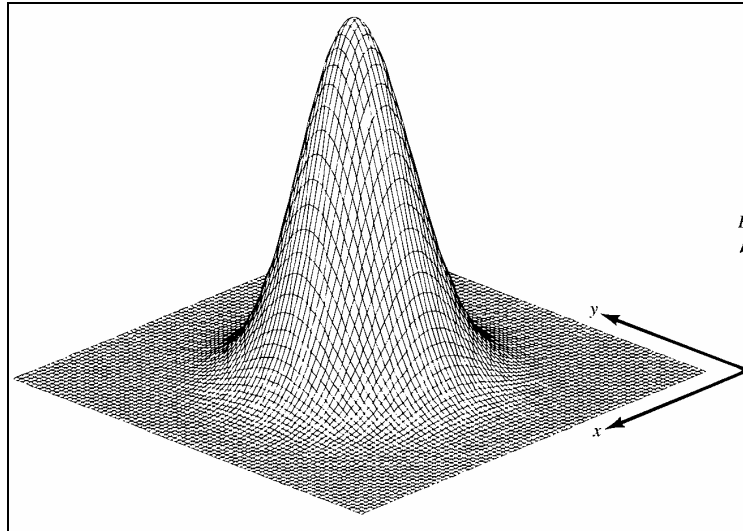


Figura 3.15 – Distribuição de energia num perfil Gaussiano [12].

Optimização da iluminação

A distribuição de energia para o modo TEM_{00} , que tem a forma gaussiana, é descrita pela equação 3.5, tendo em conta o polinómio de Hermite H_{00} , e as relações descritas anteriormente entre o parâmetro complexo q e a largura do feixe w :

$$TEM_{00} = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right) \quad (3.5)$$

Neste tipo de perfil a fase é constante ao longo da frente de onda, no entanto a energia encontra-se fortemente concentrada no eixo de propagação. Esta distribuição de intensidade na frente de onda conduz a alguns problemas no tratamento dos padrões de interferência. Sendo a modulação das franjas muito pequena e a câmara utilizada perto da saturação não é possível com esta iluminação obter informação de igual qualidade em toda a área iluminada. Para obstar a este problema só a parte central do feixe é utilizada na iluminação da superfície do objecto desperdiçando-se assim parte da energia disponível. Estes factos são postos em evidência na figura 3.16.

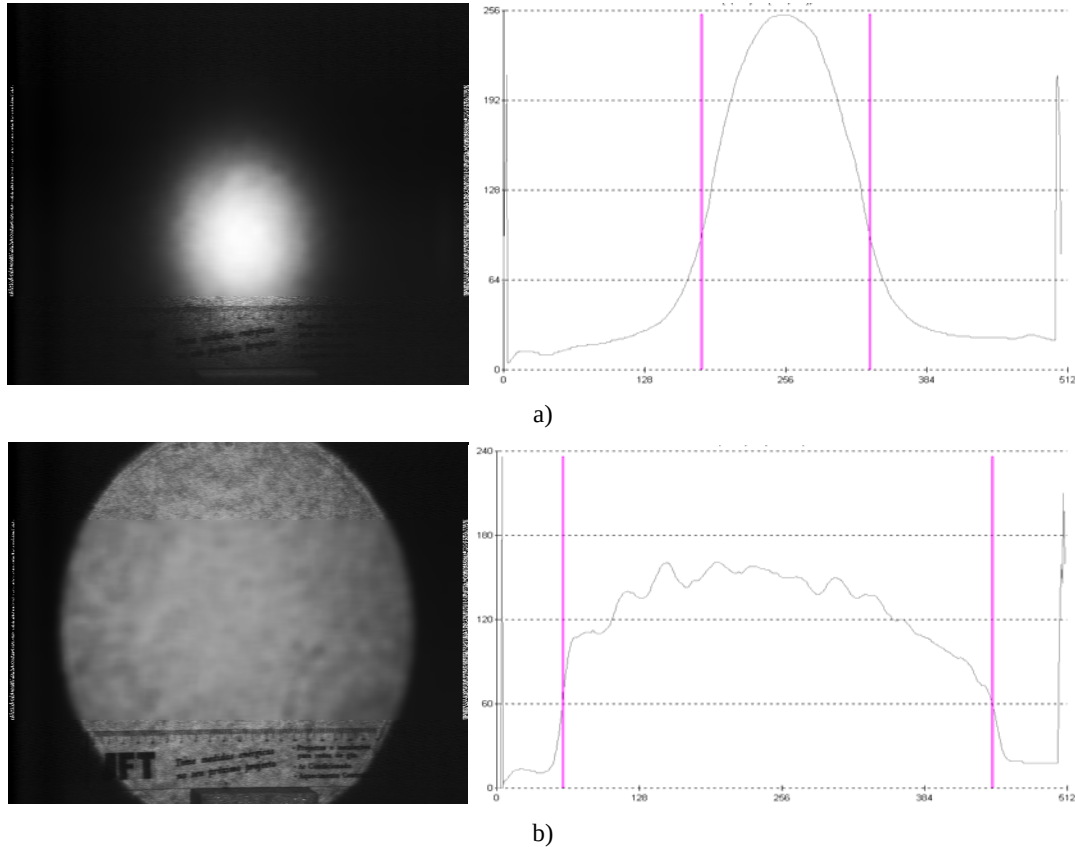


Figura 3.16 – Distribuição de intensidade de um feixe a) gaussiano e b) onde se utiliza apenas a sua parte central.

No sentido de aumentar a eficiência do sistema procurou-se tratar o feixe de iluminação de forma a transformar a sua distribuição gaussiana numa mais conveniente para este tipo de aplicação. Dado que a resposta do detector de imagem é igual para todos os pixeis, a iluminação mais adequada seria aquela que permitisse obter uma iluminação uniforme ao longo de toda a imagem.

Vários estudos têm sido publicados nesta área, designada por *beam-shaping*, tendo alguns investigadores reivindicado a solução para o problema [13]. Várias soluções foram propostas para transformar um feixe de intensidade gaussiana numa frente de onda de intensidade uniforme. Dickey et al. propôs a utilização de alguns componentes ópticos especiais e transformadas de Fourier para obter os perfis de intensidade adequados a cada aplicação.

Na figura 3.17 apresenta-se algumas simulações numéricas dos resultados publicados por estes investigadores. Outras soluções são propostas, envolvendo espelhos especialmente fabricados [14] ou hologramas gerados por computador [15]. Estes últimos, permitem gerar áreas uniformemente iluminadas com geometria complexa mas são contudo dependentes da distância da fonte de luz ao objecto.

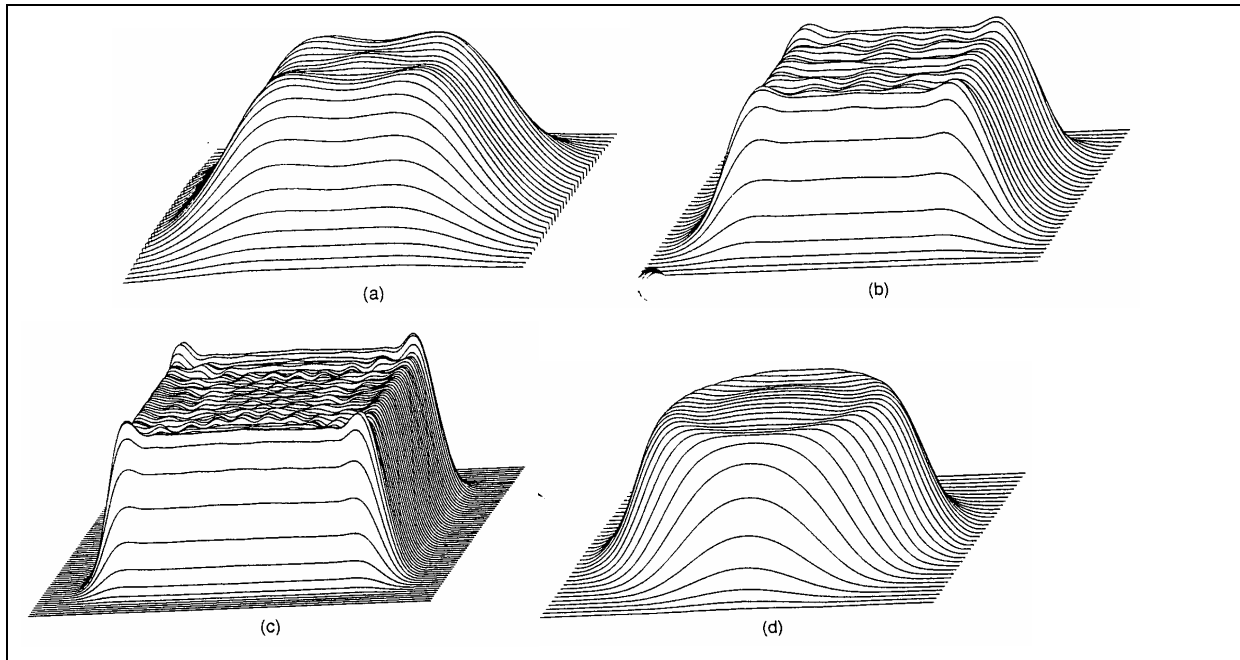


Figura 3.17 – Várias geometrias obtidas por *beam profile shaping* a partir de um feixe gaussiano.

Uma forma astuciosa e que conduz a padrões de *speckle* com uma grande uniformidade na distribuição de energia pode ser encontrada no sistema de *shearography* LTI4000. Neste, um feixe *laser* é expandido através de uma lente que serve de entrada a um percurso luminoso de reflexões múltiplas. No fim deste percurso a forma gaussiana do feixe é de tal forma alterada que se consegue uma distribuição de intensidade próxima da uniforme.

Uma outra forma de alterar a distribuição de intensidade que incide na câmara CCD, de forma a torná-la mais uniforme, passa pela utilização de fibras ópticas. Estes guias de onda são descritos no parágrafo seguinte. As fibras ópticas permitem ainda tornar os sistemas de interferência mais compactos, imunes a ruído e utilizáveis em zonas de difícil acesso.

3.1.4 - FIBRAS ÓPTICAS

As fibras ópticas fornecem um método elegante de transferir frentes de onda ao longo de caminhos complexos, conservando as distribuições de fase e de intensidade da frente de onda de entrada. Para além disso, as fibras ópticas são imunes às poeiras e aos desalinhamentos mecânicos, que afectam os sistemas

ópticos baseados em componentes individuais. Os divisores de feixe clássicos podem desta forma ser substituídos pelos seus equivalentes em fibra óptica, os acopladores direccionais, que existem numa grande variedade de razões de transferência, ver figura 3.18.

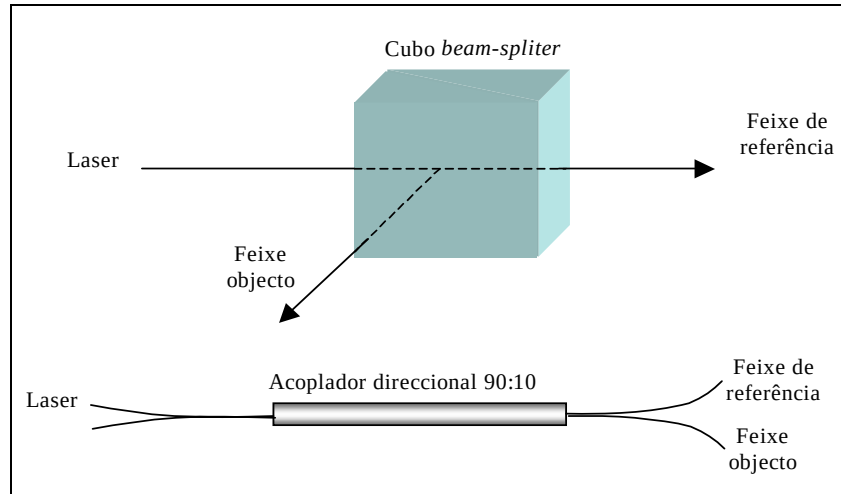


Figura 3.18 – Divisor de feixe clássico, por cubo *beam-splitter* e por fibra óptica através de um acoplador direccional.

As fibras ópticas podem ser utilizadas em diferentes partes do sistema interferométrico. Podem ser utilizadas para enviar a luz do *laser* ao objecto, no transporte de luz pelo braço de referência ou em ambos. Neste último caso as fibras ópticas são utilizadas também no dispositivo de modulação de fase. Os dispositivos convencionais de modulação de fase, translação de um espelho solidário com um elemento **piezoeléctrico**, podem ser substituídos com a mesma eficácia por cilindros piezoeléctricos em torno dos quais a fibra é enrolada [16,17].

A um nível básico podemos definir uma fibra óptica como sendo um meio transparente coaxial e infinitamente longo com uma estrutura básica como se representa na figura 3.19. O seu princípio de funcionamento baseia-se no fenómeno da reflexão interna total da luz na interface núcleo/bainha.

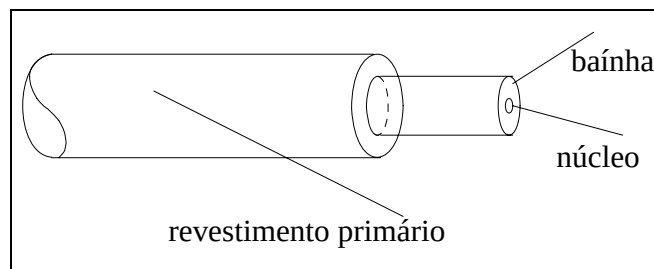


Figura 3.19 – Estrutura básica de uma fibra óptica

O núcleo central, que guia a luz, tem um índice de refacção maior (n_1) que o índice de refacção da bainha (n_2). No limite da óptica geométrica, que corresponde a razões entre o raio do núcleo e o comprimento de

onda elevados, a luz propagar-se-á sem perdas se for lançada para que o cone de raios que encontra a interface núcleo/bainha não exceda o ângulo crítico de aceitação θ_1 [18]. Este ângulo é obtido a partir da lei de Snell para a refração. Para além da fibra óptica propriamente dita existe um revestimento primário para evitar a multiplicação de fracturas, manter a estabilidade das características de transmissão e garantir a protecção das fibras e evitar a sua fragilização devida a efeitos ambientais, nomeadamente a humidade.

A natureza de guia de ondas electromagnéticas das fibras ópticas é determinada em primeira análise por [19]:

- (i) raio do núcleo - a ;
- (ii) abertura numérica, NA , igual a $n_1(2\Delta)^{1/2}$, em que $\Delta = [1 - (n_2 / n_1)]$;
- (iii) constantes de propagação da luz na fibra - β .

Os tipos fundamentais de fibras, no que respeita a dimensões e a perfis de índices de refração do núcleo e da bainha, são os descritos na figura 3.20. Nesta figura os valores indicados são os diâmetros do núcleo e da bainha da fibra óptica. A análise completa da propagação de luz em guias de onda, como as fibras ópticas, foi extensivamente tratada por vários autores como por exemplo Gloge [20] e Midwinter [21].

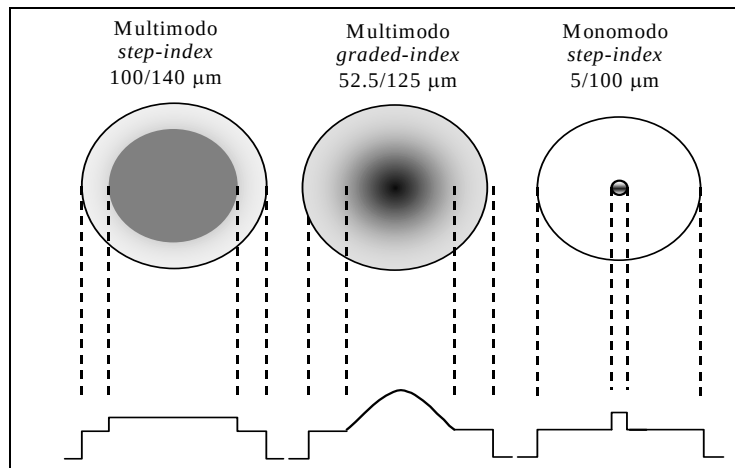


Figura 3.20 – Tipos de fibras ópticas mais comuns.

Gloge demonstrou que as equações de Maxwell, que descrevem a propagação da luz nas fibras ópticas, se poderiam resolver no limite de $\Delta \rightarrow 0$, correspondendo a *luz fracamente guiada*. Esta análise mostra que, em geral, não existe apenas um caminho óptico para a luz injectada na fibra, mas um número elevado de caminhos - *modos* - que têm diferentes constantes de propagação. A constante de propagação β de um qualquer modo guiado na fibra é a componente longitudinal da constante de propagação k . Um modo propaga-se enquanto $\beta_2 < \beta < \beta_1$, em que [19]:

$$\beta_2 = \frac{2\pi n_2}{\lambda} \quad \text{e} \quad \beta_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda} \quad 3.6$$

O número de modos na fibra pode ser calculado pela seguinte expressão [21]:

$$N = \frac{4V^2}{\pi} \quad 3.7$$

em que V é a "frequência normalizada" da fibra e é igual a,

$$\frac{2\pi a}{\lambda} \times (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad 3.8$$

Quando $V < 2,405$ apenas o modo de ordem mais baixa, o modo LP_{01} , se propaga e a fibra é denominada de mono modo. Uma explicação detalhada sobre a propagação de luz numa fibra óptica pode ser encontrada em G. Kaiser [18].

Tipos de iluminação multimodo e monomodo

Para a iluminação dos sistemas de Interferometria de *Speckle* as características mais importantes da radiação são a coerência, a forma da frente de onda e a polarização. Características essas que variam com o tipo de fibra (mono modo ou multimodo). Assim, conforme o valor de V existem tipos de padrões de iluminação no campo longínquo diferentes. Se a fibra é mono modo temos um perfil gaussiano. Se a fibra é multimodo obter-se-á um padrão de iluminação mais complexo que corresponde à interferência dos vários modos que se propagam na fibra óptica [22].

Devido à grande sensibilidade da fibra a perturbações ambientais, nas fibras multimodo, os percursos dos modos que nela se propagam facilmente são alterados, estando, por isso, o padrão de iluminação constantemente a variar, dando origem a um feixe instável e com inúmeras zonas claras e escuras. Assim, a iluminação de um sistema de Interferometria de *Speckle* deve provir de fibras mono modo pois são estas que fornecem uma iluminação mais estável e com uma distribuição de intensidade mais uniforme. A estabilidade resulta de apenas se propagar um modo na fibra. Numa fibra mono modo a divergência é determinada pela abertura numérica da fibra (NA).

Assim, no caso de se pretender iluminar uma área maior é necessário usar uma fibra mono modo com grande abertura numérica, ($NA > 0,30$). Para se obterem fibras ópticas com aberturas numéricas desta grandeza é usual aumentar o nível de dopagens. Este aumento provoca também maiores perdas na fibra, mas que não serão de grande importância para aplicações em que o cabo de iluminação tem apenas alguns metros. Alguma atenção deve também ser tida no que respeita às potências envolvidas pois o aumento de dopantes diminui o limiar de destruição da fibra. Outra maneira de aumentar a área iluminada consiste na fabricação de uma micro-lente no extremo da fibra. Existem duas técnicas que permitem a sua fabricação; ou por ataque químico ou com aquecimento por arco eléctrico.

No primeiro caso o ataque químico é feito com uma solução de fluoreto de amónia e ácido fluorídrico. A superfície convexa do extremo da fibra é conseguida através de uma diferente taxa de reacção entre o núcleo e a solução e a bainha e a solução. Para fibras *step-index* existe essa garantia pois os cantos convexos surgem por serem mais rapidamente atacados devido à maior densidade superficial de radicais livres [23]. No caso de

surgirem micro-fissuras estas podem ser eliminadas por tratamentos térmicos controlados. O aparecimento de fissuras é evitado se for possível evitar a contaminação por humidade. A técnica de *fusion-splicer*, isto é, de aquecimento por arco eléctrico, também permite a criação de uma micro-lente no extremo da fibra devido à tensão superficial do vidro fundido. No entanto, nesta técnica é difícil controlar a geometria da lente durante a sua formação. O método é útil se várias tentativas forem possíveis para a sua produção, pois a maior parte das vezes a lente sai imperfeita [24].

Para aumentar a área de iluminação de uma fibra óptica existe ainda a possibilidade de utilizar um sistema óptico que permite expandir o feixe [25] e transformar o seu perfil gaussiano em plano [26,27]. De referir que para diminuir a influência das perturbações ambientais na propagação da luz as fibras ópticas devem ser birrefringentes.

Quando integradas em sistemas interferométricos as fibras ópticas usadas para a iluminação dos objectos permitem um aumento significativo da flexibilidade geométrica do sistema e uma maior facilidade de instalação. No entanto, a introdução de fibras ópticas acarreta uma forma nova de instabilidade do sistema devido às perturbações ambientais que induzem variações de fase nos feixes que nelas se propagam [19]. As franjas obtidas desta forma são instáveis, pois a sua polarização varia constantemente e a sua descorrelação vai decrescendo progressivamente. Para contrariar este efeito utilizam-se fibras ópticas com forte birrefringência que mantêm a polarização. Uma descrição detalhada deste tipo de fibras ópticas pode ser encontrado em [27].

Fibra óptica em frente ao CCD

A colocação da fibra óptica num sistema interferométrico reveste-se de alguns cuidados para que a estabilidade do feixe seja a mais elevada possível. A fibra é utilizada conjuntamente com uma cablagem de plástico, com um suporte metálico com aperto por parafuso e com um tubo de aço que servirá de último suporte à fibra. Este dispositivo está representado na figura 3.21. A fibra sem cablagem é introduzida no tubo metálico onde anteriormente se colocou cola *epóxy*. A extremidade livre é então cortada e polida, recorrendo a papel de diferentes granulometrias.

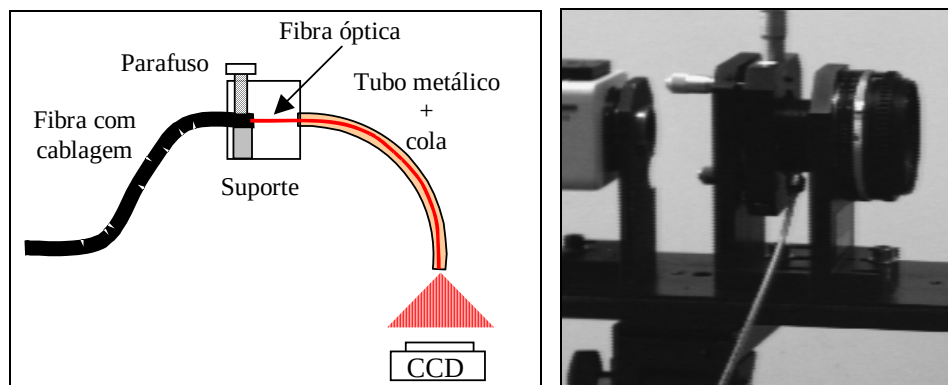


Figura 3.21 – Suporte de fixação da fibra óptica e colocação no eixo óptico do sistema interferométrico.

A extremidade da fibra é colocada no centro da abertura óptica do sistema formador de imagem. O suporte deverá posicionar a fibra de forma a iluminar todo o CCD numa direcção coincidente com o eixo óptico do sistema de imagem. Uma tolerância de cerca de $\pm 1^\circ$ é admitida para este alinhamento. Com efeito, o centro da lente formadora de imagem não é necessário e pode por isso ser obstruído, colocando nela o sinal de referência proveniente da fibra óptica [28].

O ajuste da intensidade do feixe de referência faz-se recorrendo ao desajuste axial ou longitudinal do feixe incidente ou, por exemplo, através de um mecanismo de alteração da polarização do feixe incidente. Nos feixes pulsados o desajuste de alinhamento utilizado é o longitudinal.

Nas configurações interferométricas usadas a fibra óptica era monomodo, da companhia 3M, com um diâmetro de núcleo de 5 μm e de bainha de 125 μm e com uma abertura numérica, $NA = 0.2$. O acoplamento entre o feixe laser incidente e a fibra óptica fez-se recorrendo a uma objectiva de microscópio x10 com uma distância focal de 16.9 mm. A utilização de uma objectiva de microscópio com fraco poder focal permitir realizar um sistema de acoplamento mais eficiente, pois a maior parte da energia incidente é enviada com um desvio angular pequeno, o que favorece o fenómeno da reflexão total no interior da fibra óptica.

Fibra óptica em sistemas de alta energia

A utilização de fibras ópticas em sistemas de elevada energia reveste-se de cuidados particulares. As extremidades devem ser cuidadosamente polidas para que não haja reflexões anómalas que destruam a própria fibra. Para além disso o alinhamento deve ser cuidadoso para que a luz incida no núcleo da fibra; assim a necessidade de dissipação de calor é desprezável. Um desvio deste alinhamento pode provocar um aquecimento da bainha ou do revestimento, zonas com maior nível de impurezas, que não se deixam atravessar pela luz.

Durante o projecto BRITE BE95-1147 "*Pulsed Digital Holography and Shearography*" (PDHS) [29], vários estudos foram feitos para determinar a máxima energia capaz de ser transmitida por uma fibra monomodo. Em conclusão, as fibras monomodo são perfeitamente capazes de dirigir o feixe de referência, pois este tem uma energia que é cerca de 10% da do feixe objecto. A energia necessária para que o feixe de referência ilumine um CCD é inferior a 100 mJ/cm². São, no entanto, mais dificilmente utilizáveis no transporte do feixe objecto, excepto para objectos que não necessitam de uma grande quantidade de energia na sua iluminação. Os valores de energia considerados seguros são da ordem dos 0.5 mJ por impulso. Os testes foram realizados utilizando um laser de Rubi de 30 mJ@694nm.

A utilização de fibras ópticas em sistemas pulsados não obriga ao uso de fibras com preservação de polarização, pois os tempos de duração da medida são muito reduzidos e os fenómenos de birrefringência não se fazem sentir.

Em conclusão pode dizer-se que os sistemas com fibras ópticas são mais simples e robustos que os convencionais, o que os torna mais atractivos para as aplicações industriais fora de ambientes laboratoriais. Podem ser operados à distância utilizando lasers que pelo seu tamanho sejam de difícil deslocação e garantem que a luz só sai no local desejado e na quantidade pretendida, tornando o sistema mais seguro. Para

além disso eliminam o uso de filtros espaciais para remoção do ruído óptico e fornecem frentes de onda suaves (gaussianas). As frentes de onda das fibras monomodo são por natureza suaves devido às suas dimensões, não requerendo óptica adicional [24].

Deve referir-se ainda que a utilização de *lasers* de impulsos, capazes de gerar energias elevadas, implica quase sempre a utilização de componentes ópticos (espelhos e lentes) especialmente preparados para não serem danificados por tais energias. A forma mais usual de os preparar consiste na deposição de uma camada, *coating*, na superfície destes componentes capazes de difundir rapidamente o calor acumulado durante os impulsos. Estes elementos ópticos especiais estão apenas localizados no percurso de iluminação do objecto. O sistema interferométrico formador de imagem e o braço de referência não necessitam deste tipo de tratamento nos seus componentes ópticos pois interagem com energias reduzidas.

3.2 – DETECTORES CCD

O enorme desenvolvimento verificado nas últimas décadas na indústria electrónica tem permitido a constante evolução dos meios de registo vídeo. A actual tecnologia CCD (*Charged Coupled Device*) permite soluções compactas e com preços compatíveis com as utilizações em sistemas de Interferometria de *Speckle*. Estes detectores são constituídos por matrizes de elementos foto-sensíveis, condensadores, que convertem a energia luminosa incidente em cargas eléctricas. Trata-se de um conjunto de elementos discretos de reduzidas dimensões (da ordem da dezena de micrómetros), designados por *pixel*. Os detectores têm associada uma electrónica de controlo que permite a utilização com sinal vídeo convencional, mas também o registo assíncrono de imagens, isto é, a exposição de elevada velocidade e a integração de vários quadros numa só imagem. Actualmente, uma nova tecnologia designada por C-MOS permite construir detectores que poderão substituir com vantagem os de CCD. Estes, além das funções já disponíveis nos CCD possuem ainda a capacidade de controlo e endereçamento individual de cada um dos *pixels*. Daqui poderá sair uma solução numérica que evite os problemas causados pela distribuição gaussiana da intensidade característica da emissão laser TEM₀₀.

A divisão habitual das câmaras CCD faz-se através da forma como as cargas são transferidas entre a zona de imagem e a zona de armazenamento para serem posteriormente processadas. Assim, podemos ter CCD's *Interline-Transfer* ou CCD's *Frame-Transfer* [29].

Princípio de funcionamento de uma câmara CCD interline-transfer

A maior parte das câmaras CCD actuais utiliza detectores com tecnologia *interline-transfer*. Nestes, a zona sensível à luz está isolada opticamente da zona de acumulação final de carga, o *shift-register*, através de uma

porta de transferência, o *transfer-gate*. O *transfer-gate* está inicialmente a um potencial menor que as linhas de foto-sensores, o que evita que electrões gerados migrem para o *shift-register*.

Como se representa na figura 3.22, um *shift-register* vertical está adjacente a cada uma das linhas de foto-sensores e tem como função permitir que durante o tempo de exposição a carga criada devido à luz incidente seja acumulada nos foto-sensores. Quando o sinal *transfer-gate* é activado, todas as cargas acumuladas nos elementos foto-sensíveis são transferidas para os *shift-registers* respectivos. Ou seja, após um certo tempo de integração o potencial do *transfer-gate* aumenta e os electrões são forçados a moverem-se em direcção ao *shift-register* onde se mantêm separados como pacotes de cargas. Através do controlo adequado do potencial dos eléctrodos do *shift-register* estes pacotes de carga podem ser lidos.

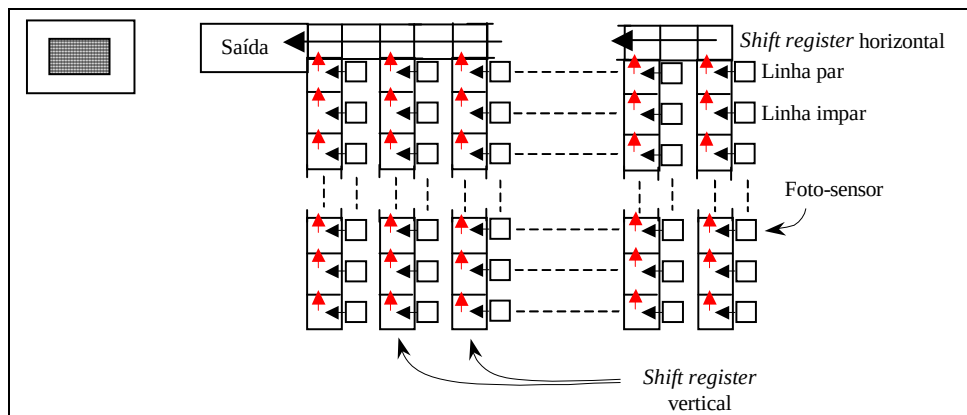


Figura 3.22 – Diagrama esquemático de um detector CCD *interline-transfer*.

Quando se utiliza este tipo de sensor para emissão em vídeo convencional as linhas pares e ímpares são lidas alternadamente após um tempo de integração de 40 ms (CCIR) ou 33.3 ms (NTSC). Estas “meias” imagens são designadas como “quadros”. Os dois quadros são novamente recombinaados para formar uma imagem completa. Este tipo de leitura, que é utilizada para evitar o ruído de *flicker* (ou 1/f), é designado por “interlaçada” e está representado na figura 3.23. Aqui, verifica-se que mesmo se a carga é acumulada em todas as linhas do CCD, o sinal de *transfer-gate* limita a leitura das linhas ímpares ao quadro ímpar e a leitura das linhas pares ao quadro par.

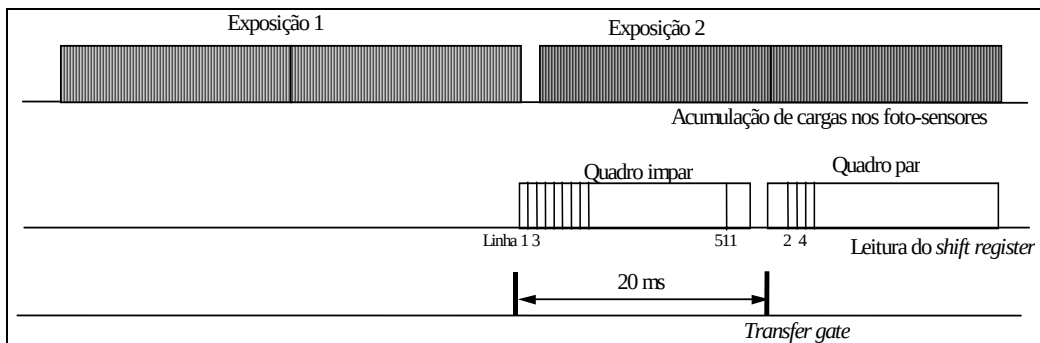


Figura – 3.23 – Leitura interlaçada num detector CCD *interline-transfer*.

A maior parte das câmaras CCD funcionam em modo interlaçado no sentido de produzirem um sinal vídeo convencional. Isto significa que um quadro contém informação das linhas ímpares do CCD e o quadro seguinte contém a informação das linhas pares. Quadros, i.é. meias-imagens, são adquiridos a 50 Hz (sistema europeu) e, por conseguinte, as imagens completas são obtidas a 25 Hz.

Durante o tempo de exposição do próximo quadro, as cargas armazenadas nos *shift-registers* verticais são sequencialmente lidas (linha-a-linha) através do *shift-register* horizontal.

As câmaras convencionais existentes têm, normalmente, tempos de *transfer-gate* da ordem dos 3 μ s e podem ser adquiridas a preços relativamente baixos. Os limites temporais deste tipo de registo são, inferiormente o tempo de *transfer-gate* e superiormente o sinal de sincronismo vertical (20 ms). Estas câmaras, apesar de funcionarem em modo interlaçado, podem ser uma opção interessante para serem utilizadas com lasers de impulso se metade da resolução vertical disponível pelo CCD for suficiente para as medições. Uma configuração óptica que utilize uma câmara CCD *interline-transfer*, em modo interlaçado, implica que para se poder comparar dois quadros é necessário que o *speckle* seja de grandes dimensões (o mesmo *speckle* deve estar sobre as linhas pares e ímpares para poder ser comparável em instantes diferentes). As restrições temporais deste tipo de leitura vídeo obrigam a que cada quadro provenha de um impulso diferente. Para o *speckle* ser grande é necessária uma abertura do sistema óptico pequena o que implica a necessidade de uma forte iluminação do objecto.

Para dispor da total resolução do sensor é necessário utilizar câmaras a funcionar em modo não-interlaçado, ou *progressive scan*. Neste caso, os quadros são imagens completas. Existem actualmente câmaras, ditas não convencionais, que podem funcionar em modo não-interlaçado com tempos de *transfer-gate* da ordem dos 5 μ s. Estes tempos eram, no início da década de 90, de cerca de 300 μ s [30].

Na figura 3.24 representa-se o tamanho de *speckle* necessário para utilizar um CCD em *interline-transfer* interlaçado e em *interline-transfer progressive scan* para ler um padrão de *speckle* em duas situações distintas e obter um interferograma da sua correlação.

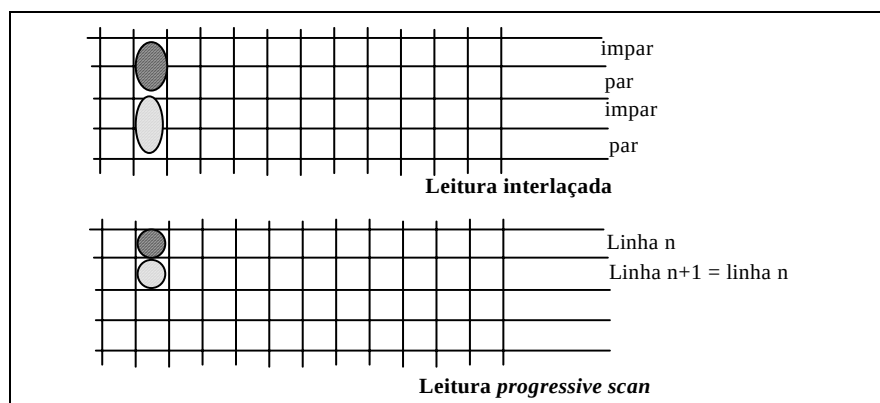


Figura 3.24 – Requisitos relativos ao tamanho do grão de *speckle* para a leitura de um sinal de uma câmara CCD *interline-transfer* a funcionar interlaçada e em *progressive-scan*.

Princípio de funcionamento de uma câmara CCD frame-transfer

Os CCD's *Frame-Transfer* são fisicamente diferentes dos *interline-transfer*, pois são divididos em duas zonas bem distintas: a zona de imagem e a zona de armazenamento, como se representa na figura 3.25. Ambas consistem em *shift-register* paralelos separados por uma parede isolante (*channel-stop*). Após o tempo de integração todos os pacotes de carga são rapidamente transferidos, linha a linha, para a zona de armazenamento onde posteriormente são lidos através de um *shift-register* horizontal. Desta forma pode fazer-se a aquisição de duas imagens separadas temporalmente por tempos já não da ordem das dezenas de milissegundos (40 ms) mas da ordem das centenas de microsegundos (300 μ s). Um conhecimento aprofundado dos vários tipos de detectores é imprescindível para otimizar as montagens ópticas com registo electrónico.

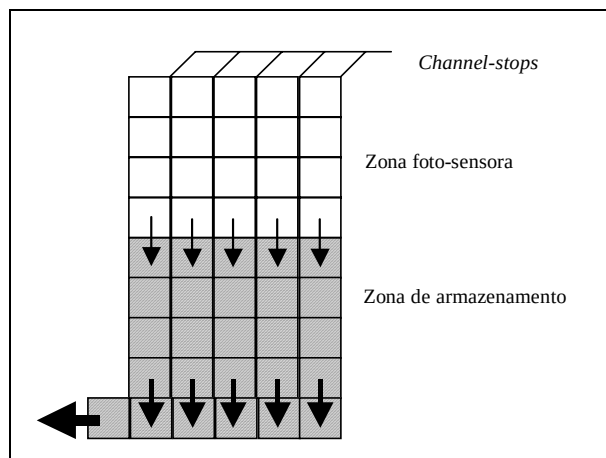


Figura 3.25 – Diagrama esquemático de um detector CCD *frame-transfer*.

Estas câmaras permitem também uma leitura interlaçada, embora, neste caso, as cargas tenham de ser recolhidas alternadamente nos diferentes eléctrodos. Como todos os pacotes de carga são transferidos para a zona de armazenamento em cada quadro o tempo de integração é diminuído para metade em relação aos CCD *Interline Transfer*. (20 ms ou 16.7 ms).

CCD's e a caracterização de fenómenos rápidos

A caracterização de fenómenos dinâmicos recorrendo a *lasers* de emissão contínua apenas é possível no estudo de fenómenos lentos ou periódicos. Um CCD convencional poderá ser utilizado para realizar correlação em dupla-exposição ou em *time-average*, no caso de fenómenos cuja frequência permita registar vários ciclos de vibração em cada imagem. No entanto, quando é necessário efectuar medições sobre fenómenos periódicos rápidos ou transientes o recurso aos *lasers* de emissão contínua não é viável pela elevada potência de iluminação necessária. Neste caso, é necessário dispor de *lasers* de emissão pulsada com os quais é possível obter impulsos de elevada energia em tempos muito curtos. Este tipo de iluminação não é normalmente compatível com os sistemas vídeo convencionais. Para efectuar o registo assíncrono de padrões

de *speckle* é necessário dispor de CCD's com uma electrónica que permita efectuar o *reset* do detector, controlar o tempo de exposição e abreviar o tempo entre dois registos. A utilização deste tipo de sensor condiciona o tipo de medida a efectuar, pois a amplitude e a temporização dos sincronismos são impostos pelo fabricante. Assim, cada tipo de medição, dupla exposição ou múltipla exposição, exige a prévia escolha do CCD com registo assíncrono que melhor se adapta ao fenómeno em estudo [31].

Actualmente o LOME dispõe de várias câmaras de CCD. Todas elas podem funcionar em modo contínuo, no entanto só algumas podem funcionar em modo de dupla aquisição assíncrona (aquisição de duas imagens separadas de alguns microsegundos $\cong 5\mu s$). Das câmaras disponíveis existem três com capacidade para realizar a dupla aquisição assíncrona, embora esta operação seja realizada de forma diferente. Assim tem-se:

- Câmara **KODAK ES1.0** – Câmara com saída digital de elevada resolução (1008×1018 linhas) com 10 *bit/pixel* em que a dupla aquisição é realizada numa memória de imagem exterior à câmara.
- Câmara **SONY XC8500CE** – Câmara com saída analógica, com resolução de 736×578×8 *bit* em que a dupla aquisição é feita com a ajuda de uma extensão de memória.
- Câmara **MICAM** – Câmara de resolução semelhante à Sony e electrónica auxiliar. Neste caso são adquiridos um quadro com as linhas pares e outro com as linhas ímpares, sendo posteriormente separados para se poderem subtrair.

No início deste trabalho, no entanto, não se encontrava disponível no LOME nenhuma câmara que permitisse o registo assíncrono de imagem e que por isso fosse passível de ser utilizada em dupla exposição. Desenvolveu-se então um sistema de aquisição assíncrona baseado na câmara MICAM e numa electrónica auxiliar que será descrito no parágrafo 3.2.1. As outras duas câmaras referidas surgiram no mercado durante o decorrer deste trabalho e permitem, de fábrica, o *reset* assíncrono. Sendo modelos recentes vários problemas foram encontrados, tendo sido a maior parte deles resolvidos durante este trabalho.

3.2.1 – CÂMARA CCD PARA DUPLA-EXPOSIÇÃO (MICAM)

A primeira referência à gravação de duplos impulsos com câmaras CCD convencionais é de R. Spooren, em finais de 1990 [30]. A solução proposta permite ultrapassar com sérias limitações o facto do registo em vídeo *standard* se efectuar periodicamente e, neste caso, se pretender apenas registar duas imagens. No início de 1992 Spooren propôs uma solução que efectua registos independentes nos quadros pares e ímpares de uma imagem para que os dois impulsos do *laser* possam ser separados *à posteriori* [32]. Esta solução utiliza equipamento vídeo convencional e um circuito electrónico desenvolvido para o efeito.

A solução utilizada neste trabalho foi desenvolvida em conjunto com o INESC Porto e foi designada por MICAM dado ser essa a marca da câmara utilizada. A câmara MICAM VHR (Digital Vision) é uma câmara CCD monocromática com um tempo de integração variável. Este tempo de integração variável (exposição do CCD à iluminação exterior) é controlado electronicamente e pode variar entre 1/50 seg e 1/10000 seg. O

varrimento é feito em 625 linhas de forma interlaçada a uma frequência de 50 Hz. O nível mínimo de iluminação é de 1.0 Lux (para $F=1.4$).

Esta é uma câmara CCD convencional que tem a possibilidade de *reset* externo e assíncrono, esta foi a principal razão porque foi seleccionada para a gravação de dois impulsos laser separados no tempo de alguns microsegundos. A entrada de um sinal de *reset* assíncrono faz com que a câmara reinicialize os varrimentos verticais e horizontais independentemente do estado em que se encontre. A reinicialização dura 1 μ s. O sinal de *reset* deve ser um sinal de nível TTL e com uma frente descendente. Na figura 3.26 representa-se o sistema integrado na célula óptica do sistema de Holografia-TV de duplo impulso e o interior do sistema de sincronismo, mostrando a montagem electrónica.

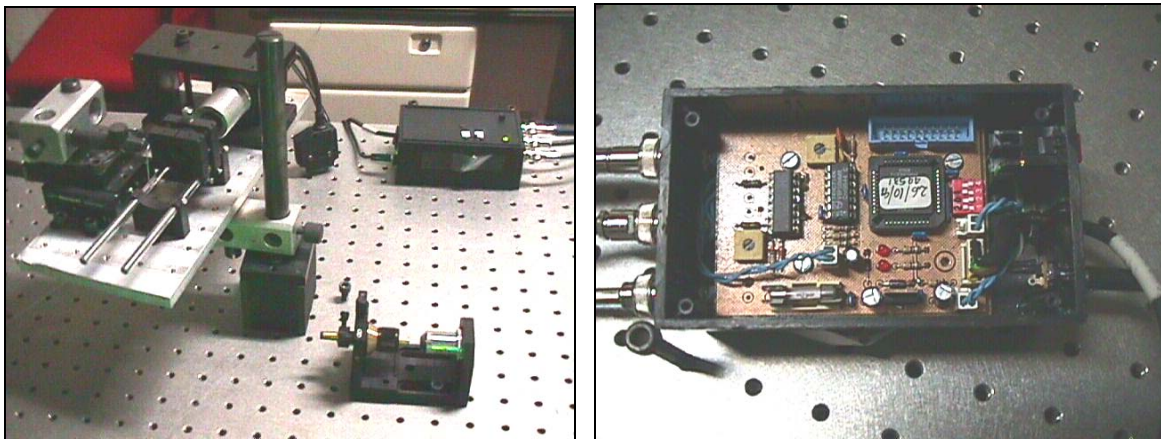


Figura 3.26 – Montagem de holografia-TV e sistema electrónico de temporização/sincronização dos disparos laser com as aquisições video.

Este sistema foi desenvolvido para ser utilizado com o laser de Nd:YAG descrito anteriormente e disponível no LOME. O sinal de sincronismo do *laser* é injectado na electrónica do sistema. Este sinal é utilizado para gerar um sinal de *reset* na câmara e um sinal de controlo do *shutter* mecânico de forma a garantir que saiam apenas dois impulsos e que estes iluminem os quadros par e impar da mesma imagem. Um cronograma dos vários sinais gerados no sistema esta ilustrado na figura 3.27.

Assim, após o sinal de *reset* o *shutter* abre e os impulsos *laser* 1 e 2 caem nos momentos anteriores e posteriores à leitura do quadro impar do sinal vídeo. A leitura do quadro par (1) é feita ainda sem luz, no final desta leitura aparece o impulso 1 e o quadro impar (2) é lido já com as suas linhas sensibilizadas pelo impulso 1. Como o impulso 2 é dado no início da leitura das linhas impares (2), a câmara já não o lê, mas as linhas pares (3) são sensibilizadas por ele bem como tinham sido pelo impulso anterior. Assim, este quadro tem a soma das duas intensidades. O último quadro (4), referente às linhas ímpares, tem o impulso 2 pois este surgiu já após o sinal de *transfer-gate* desta leitura.

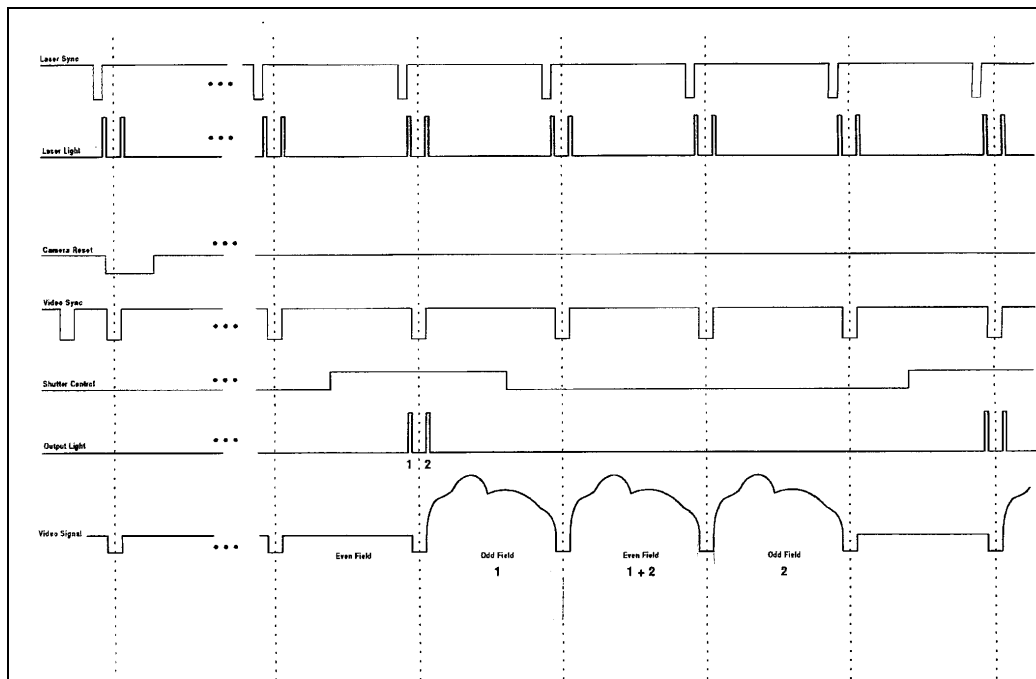


Figura 3.27 – Diagrama temporal do sistema de *trigger* e do sinal vídeo.

Os testes feitos revelaram, no entanto outro tipo de sinal vídeo de saída. Com efeito, o quadro correspondente às linhas pares (3) e o quadro correspondente às linhas ímpares (4) são diferentes do esperado. O que se obtém está representado na figura 3.28 e esta mostra que o quadro (3) apenas têm o sinal correspondente a um impulso, o 1, e o quadro (4) não foi sensibilizado por nenhum impulso.

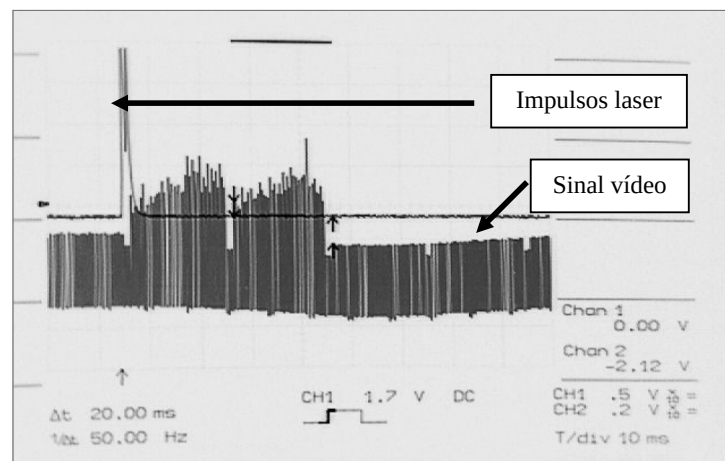


Figura 3.28 – Sinal de vídeo e impulsos *laser*.

A explicação para este facto pode ser encontrada se tivermos em conta que o tempo do impulso, cerca de 30 ns, é muito inferior ao tempo de duração dos quadros, 20 ms, e que as cargas para serem lidas devem ser mantidas durante quase 40 ms. Assim, com este ajuste de tempos o CCD não é capaz de manter a carga durante tempo suficiente para se ter num único quadro (3) os impulsos 1+2 bem como o impulso 2 no último

quadro (4). As imagens da figura 3.29 são demonstrativas disso, a gravação de um duplo impulso de um objecto sujeito a uma rotação de corpo rígido com uma velocidade angular constante não revela a existência de iluminações sobrepostas (rasto no trajecto da marca da imagem)

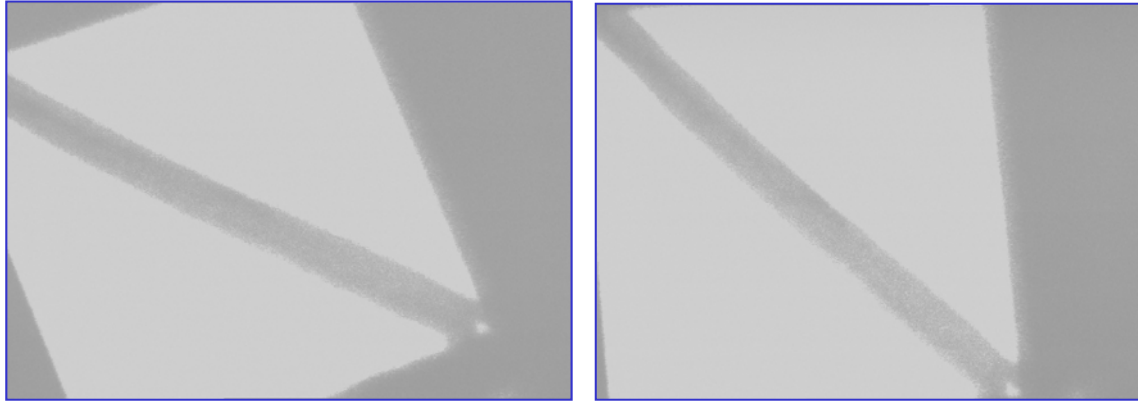


Figura 3.29 – Imagens contendo informação de apenas 1 quadro, primeiro e segundo impulsos.

A figura 3.30 representa as imagens de cada um dos quadros de onde foram retiradas as linhas sem informação, uma vez as linhas pares e outra as linhas impares. Esta é a razão para que as imagens apresentem apenas metade da altura das imagens anteriores.

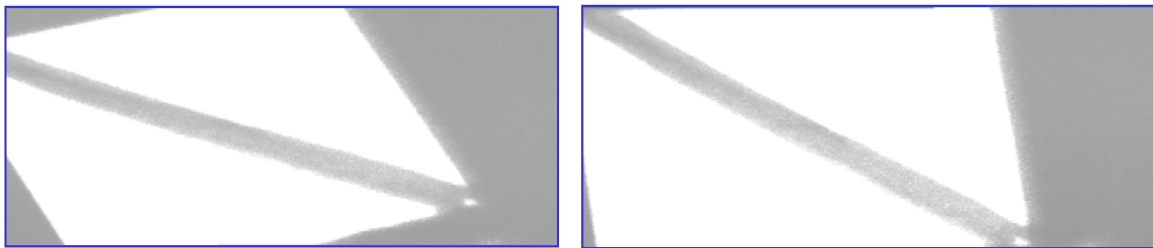


Figura 3.30 – Imagens dos quadros par e impar após remoção das linhas sem informação.

Finalmente apresenta-se na figura 3.31 o resultado da subtracção dos dois quadros, o impar com o impulso 1 e o par com o impulso 2. Este resultado pode ser reproduzido numa configuração de Interferometria de *Speckle*, de onde se poderá extrair posteriormente a variação de fase óptica de uma frente de onda proveniente de um determinado objecto.

Pode então utilizar-se um método de subtracção de quadros em que cada um deles, o quadro 2 e o quadro 3 tem apenas um impulso. Desta forma, após o desenterlaçamento das imagens obtemos dois impulsos próximos no tempo e em quadros diferentes de forma a poderem ser operados matematicamente.

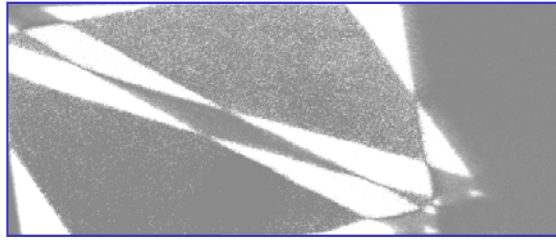


Figura 3.31 – Subtracção com rectificação dos dois quadros anteriores.

O tempo mínimo entre impulsos é ditado pelo mecanismo electrónico de mudança de quadro através do *transfer-gate*. Este tempo é de cerca de 300 μs para esta câmara e a sua representação está feita na figura 3.32, onde se observam os dois impulsos *laser*, separados por cerca de 900 μs e o sinal vídeo. Este sinal apresenta o *transfer-gate* através da linha de inversão do sinal de leitura e das seguintes 9 linhas. Após este sinal a leitura das linhas de quadro é feita normalmente.

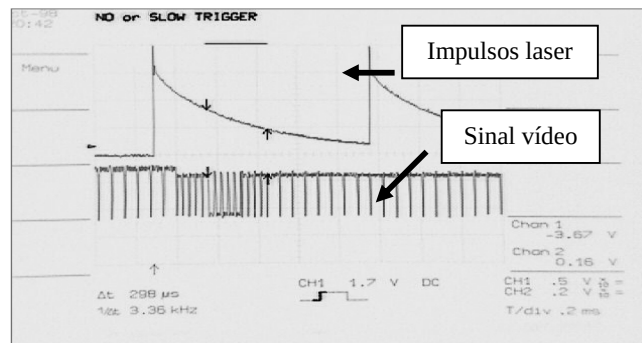


Figura 3.32 – Sinal de *transfer-gate* e impulsos *laser*.

Estes resultados preliminares foram obtidos integrando a câmara CCD MICAM num sistema completo de controlo dos sinais vídeo como se representa na figura 3.33. Neste sistema inclui-se o sistema de *trigger* desenvolvido no INESC-N e uma placa Matrox Pulsar colocada no barramento de um PC para realizar a aquisição de imagens.

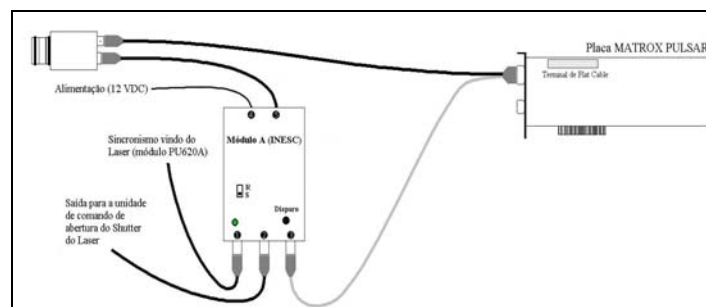


Figura 3.33 – Esquema de ligações entre os diversos componentes da câmara Micam (controlo e processamento).

Dadas as limitações deste sistema, quer em termos de resolução, quer em termos de ajuste temporal, e a possibilidade de dispor de câmaras com registo assíncrono e tempos de *transfer-gate* muito menores, após estes ensaios preliminares o desenvolvimento do sistema foi interrompido.

3.2.2 – CÂMARA CCD PARA DUPLA-EXPOSIÇÃO (SONY)

A câmara CCD Sony XC8500CE pertence à categoria das câmaras *Progressive Scan* com *frame-transfer*. Estas câmaras registam uma imagem completa que é depois transferida na sua totalidade para os *shift-registers*, permitindo que uma segunda imagem seja registada pouco tempo depois. Esta rapidez de transferência de informação só é possível porque a esta câmara está associada um módulo de memória externo, CMA87, que recebe as cargas referentes à primeira imagem. As duas imagens podem então ser registadas e lidas posteriormente. Na figura 3.34 apresenta-se a câmara CCD e o seu módulo externo de memória.



Figura 3.34 – Câmara SONY XC8500CE e módulo de memória externo CMA87.

Esta câmara tem uma resolução de 760h x 572v pixels e 8 bits de codificação em níveis de cinzento. Pixels quadrados $8.3 \times 8.3 \mu\text{m}$. O facto do sensor de CCD ser composto por células quadradas faz com que este tenha a mesma resolução na horizontal e na vertical, apresentando assim uma vantagem significativa para muitas aplicações de processamento de imagem, nomeadamente em tarefas que envolvam medição.

A Sony XC8500CE pode ser comandada exteriormente com um sinal de *trigger* externo e com um **reset** assíncrono. Foi esta a configuração utilizada durante os ensaios em Interferometria de *Speckle* de dupla-exposição.

Na figura 3.35 estão esquematizadas as ligações entre a câmara SONY XC8500CE e a placa de processamento de imagem MATROX Pulsar para a realização da dupla exposição. Neste modo de funcionamento a placa Pulsar recebe um *trigger* externo, para iniciar e controlar a primeira exposição da câmara. Esta, por sua vez, recebe um impulso de exposição gerado pela placa Pulsar no *trigger edge* para fazer o *reset* do sensor CCD e começar a primeira integração. A duração da integração desta primeira imagem deve ser inferior a $120 \mu\text{s}$. A imagem conseguida por esta integração é carregada para a memória CMA87 antes de ser enviada para a PULSAR. O tempo global para se ter acesso a esta imagem varia de 60

ms a 100 ms. Após esta imagem ter sido armazenada, o controlo de exposição é alterado na Pulsar (tempo de duração e modo de geração) e uma segunda exposição é gerada pela câmara. Cerca de 3 μ s após o término da primeira exposição a câmara está pronta para ler a segunda imagem. O tempo de exposição deverá ser superior a 120 μ s para que não ocorra *reseting* do CCD.

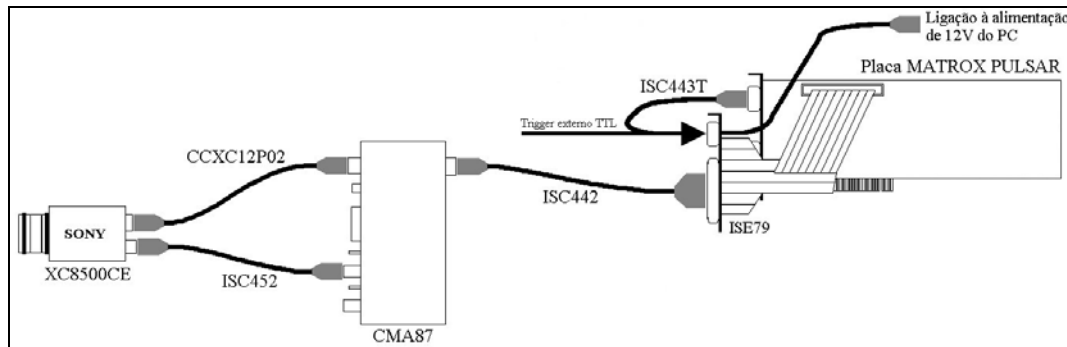


Figura 3.35 – Ligações entre SONY XC8500CE e MATROX Pulsar para a realização da dupla-exposição.

Utilizando o obturador assíncrono E-DONPISHA®, podem-se capturar objectos em movimento rápido mantendo a máxima resolução tanto na horizontal como na vertical. Através do modo de funcionamento *progressive scan* todas as linhas da câmara vídeo são extraídas por ordem ascendente, ou seja, primeiro a linha 0, depois a linha 1 e por aí em diante. O termo “*progressive scan*” designa o modo de funcionamento desta câmara, contudo, o termo “*full frame shutter*”, é mais correcto. De facto, existem CCDs com varrimento progressivo mas sem capacidade de obturação.

Em conclusão, as câmaras com obturador de câmara completo, tal como a XC-8500CE, são câmaras de varrimento progressivo e tem a capacidade de capturar objectos em movimento mantendo a máxima resolução tanto na horizontal como na vertical.

3.2.3 – CÂMARA CCD PARA DUPLA-EXPOSIÇÃO (KODAK)

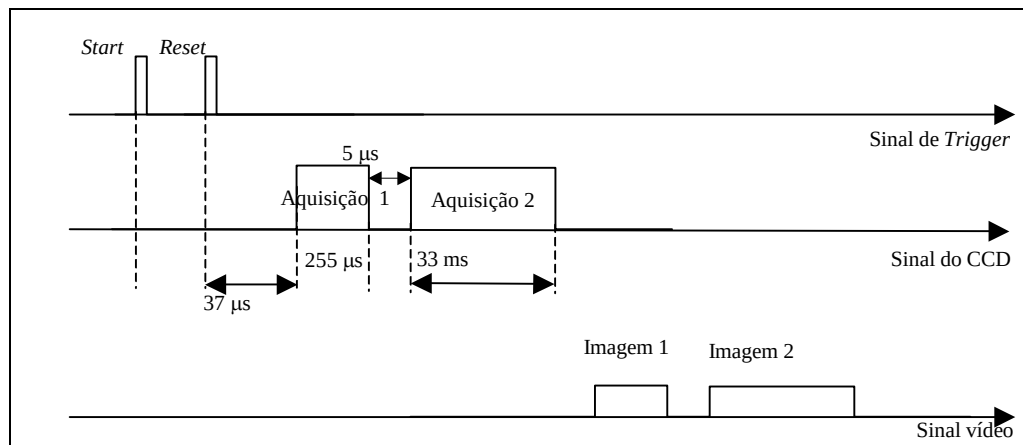
Tal como a anterior, a câmara CCD KODAK ES1.0 é uma câmara baseada na tecnologia *frame-transfer* e com leitura *progressive scan*. Esta configuração permite o registo de imagens completas em cada ciclo de leitura do CCD. No entanto, ao contrário da câmara SONY, analógica, esta é uma câmara com saída digital com uma saída vídeo codificada em 10 bits com uma taxa de repetição de 15 Hz em modo de funcionamento contínuo. A figura 3.36 representa esta câmara, que possuindo uma matriz foto-sensível de 1008h x 1018v pixels pode ser considerada como de alta resolução.

Esta câmara está dotada de um *shutter* electrónico com tempos de exposição tão pequenos como 125 microsegundos para aquisição de imagem de objectos em movimento rápido. Um modo especial de operação assíncrono, *triggered double exposure*, está disponível, e consiste na aquisição rápida de 2 imagens, tendo um intervalo de 5 μ s entre ambas.



Figura 3.36 – Câmara CCD MODAK Megapplus ES1.0

A câmara CCD KODAK ES1.0 foi escolhida como sensor nas configurações de Interferometria de *Speckle* desenvolvidas porque apresentava a possibilidade de funcionar em dupla-exposição através do modo de funcionamento ***triggered double exposure***. Este modo permite que duas imagens sejam adquiridas rapidamente pela câmara. A dupla exposição começa com o sinal de *trigger* externo, como é indicado no gráfico temporal apresentado na figura 3.37. A 1ª imagem é transferida do CCD para o sistema de aquisição de vídeo, enquanto a 2ª imagem é conservada pela matriz de fotodíodos que constitui o detector de imagem. Esta 2ª imagem é então transferida para a matriz do CCD e depois para o segundo *buffer* de imagem do sistema de aquisição de vídeo.

Figura 3.37 – Diagrama temporal da aquisição em dupla-exposição no modo *triggered double-exposure*.

De referir que esta câmara apresenta também um atraso interno de $37\ \mu\text{s}$ entre o sinal de *trigger* e o início da integração. O CCD realiza a gravação do primeiro padrão de *speckle* durante $255\ \mu\text{s}$. Um sinal interno de *shift transfer* desloca a informação dos *pixels* para os registos e um segundo padrão pode ser registado pelo detector.

A ligação desta câmara com o resto do sistema de tratamento de imagem pode ser feita através de uma ligação RS232. Esta câmara também foi utilizada com a placa de aquisição de imagem Matrox Pulsar. Na

figura 3.38 apresenta-se um esquema completo de toda a montagem necessária à preparação da câmara Kodak ES 1.0 para funcionar com aquisição em dupla exposição.

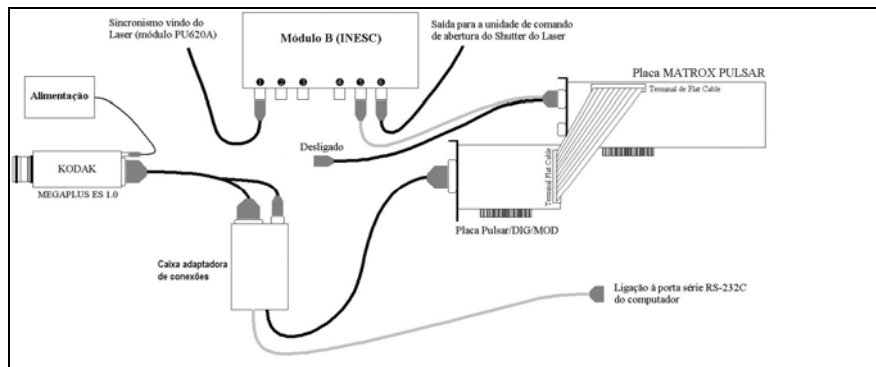


Figura 3.38 – Ligações entre KODAK ES1.0, MATROX Pulsar e sistema de sincronismo para a dupla-exposição.

As expectativas criadas em torno desta câmara da nova geração (digital, alta-resolução, ...) não foram totalmente satisfeitas. Isto deveu-se, sobretudo, ao facto de se estar na presença de uma câmara CCD digital. A existência de conflitos em termos de transferência de dados e envio de sinais entre a placa de aquisição e a câmara CCD, fez com que, em modo de dupla exposição, o registo da primeira imagem apenas se faz em 1000 x 800 pixel, como se mostra na figura 3.39, devido ao reduzido intervalo de tempo entre as aquisições. Esta limitação deve-se à placa de aquisição de imagem não ter capacidade para gerir a enorme quantidade de informação posta à disposição pela câmara. A azul na figura estão representadas as zonas que não fornecem informação útil ao interferograma.

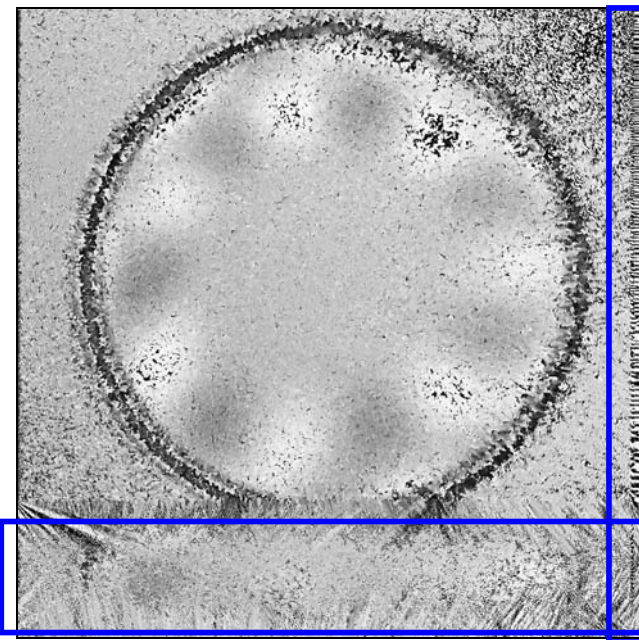


Figura 3.39 – Representação das zonas sem informação em imagens de fase obtidas pelo sistema KODAK ES1.0/Matrox Pulsar.

A resolução deste problema passará pela aquisição de uma outra placa de aquisição de imagem. A Matrox dispõe de outros modelos com melhores desempenhos mas que, obrigatoriamente, são bastante mais caros. Uma aplicação das técnicas de *Particle Image Velocimetry* recorrendo a uma câmara deste tipo foi apresentada em 1996 por Lourenço et.al [33]. Esta aplicação utilizava como placa de aquisição de imagem um modelo da Imaging Technologies a ICPCI.

3.2.4 – OPERAÇÃO DE CCD DE REGISTO ASSÍNCRONO COM LASER DE IMPULSOS

Como referido no parágrafo anterior as câmaras não interlaçadas disponíveis foram a SONY XC-8500CE e a KODAK Megaplug ES1.0. Estas câmaras serão referidas como câmaras de dupla exposição e permitem a obtenção de duas imagens contendo cada uma apenas um impulso laser. Sendo o tempo de gravação da primeira imagem de apenas 90 μs (SONY) ou 255 μs (KODAK) estas câmaras permitem que a segunda aquisição se inicie 3 μs (SONY) e 10 μs (KODAK), após o fecho da primeira. Desta forma é possível gravar separadamente os impulsos laser e o registo de fenómenos transitórios.

Na operação de um CCD de registo assíncrono com um laser de duplo impulso o laser pulsado é utilizado para iluminar o objecto em dois estados diferentes de deformação. A dupla exposição (aditiva) conduz a resultados de fraco contraste, dada a presença dos termos invariáveis, por isso, a técnica subtractiva deve ser aplicada. Esta operação é apenas possível se os padrões de *speckle* provenientes do objecto forem registados em imagens diferentes, como acontece quando se utilizam as câmaras descritas anteriormente. Assim, os dois impulsos devem ser enviados antes e depois do sinal de *transfer-gate*. A luz ambiente que chega aos fotodetectores durante o resto da aquisição pode ser negligenciada dados os curtos tempos de exposição.

Para sincronizar um sistema de aquisição de imagem com os disparos de um laser pulsado o sinal de *transfer-gate* do CCD deve ser colocado no intervalo entre impulsos. No entanto, a medição deve ser sincronizada com a estimulação da estrutura. A forma e a temporização do sinal utilizado no *trigger* do laser e da câmara são dependentes do modelo utilizado. Se a fonte de luz for um laser de Rubi a câmara CCD deve ser sincronizada como se descreve na figura 3.40. Se for utilizado na iluminação um laser de Nd:YAG, este gerará o sinal de *trigger* para o controlo do sistema.

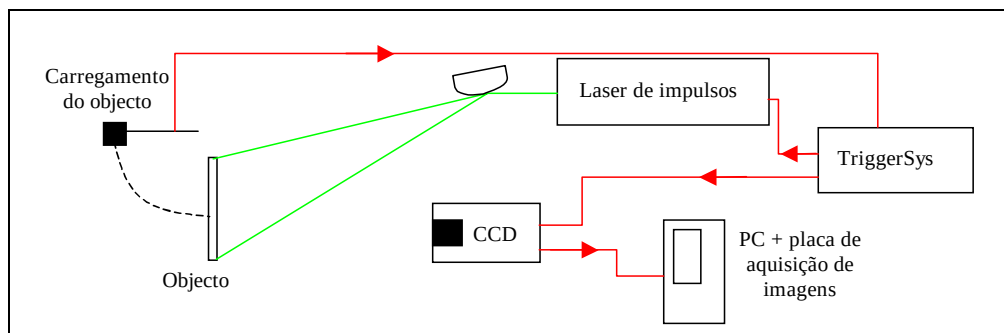


Figura 3.40 – Sistema de sincronização a ser usado com um laser de impulso.

Os sinais de atraso deverão incluir tempos necessários ao arranque de cada sistema laser. Por exemplo, o laser de Rubi dispara com 1 ms de atraso em relação ao sinal de *trigger* enquanto o laser de Nd:YAG necessita apenas de 400 μ s. Por sua vez, a câmara CCD gera um sinal de *transfer-gate* alguns μ s após receber o sinal de sincronismo. O *frame-grabber* não necessita de sinal de *trigger* pois pode ser sincronizado pela câmara. Na figura 3.41 representa-se um diagrama temporal dos sinais de atraso necessários a uma medição com um sistema integrando um laser de Rubi. Deve referir-se que se a fonte de luz utilizada fosse um laser de Nd:YAG o sinal de arranque seria o último, como se referiu no parágrafo anterior.

Não é demais salientar que em ambas as configurações, iluminação com laser de Rubi e com um laser pulsado de Nd:YAG foram obtidos resultados com bom contraste. Os padrões de interferência apresentam uma qualidade semelhante à obtida com iluminação contínua. Contudo, a operação em duplo impulso é bastante mais complexa, quer no que diz respeito ao sincronismo dos vários componentes, ao ajuste das montagens e aos cuidados a ter na operação de fontes de luz de elevada energia.

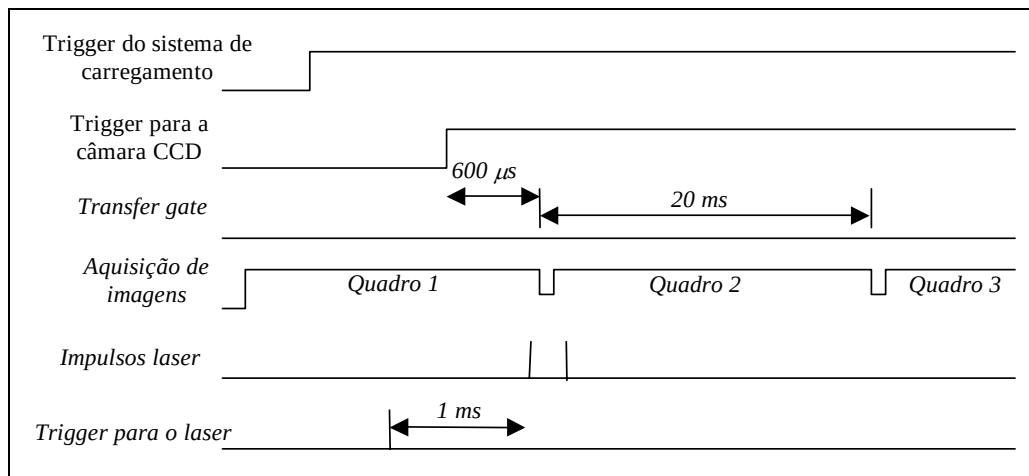


Figura 3.41 – Diagrama temporal para a obtenção de uma dupla exposição.

No caso do laser de Nd:YAG pulsado, as dificuldades vêm aumentadas. Primeiro, por se tratar de um sistema que integra 5 cavidades laser distintas que devem funcionar consistentemente. Segundo, porque devido às características deste sistema é o laser, e não o fenómeno, que desencadeia o processo de medida.

No que diz respeito à sincronização da montagem pelo laser de Nd:YAG, deve referir-se que é bastante mais difícil excitar o objecto a partir de um sinal de sincronismo do que obter a situação contrária. Neste caso a excitação do objecto terá de ser realizada automaticamente, i.e., a partir de um sinal produzido para arranque do laser é necessário gerar um sinal para desencadear uma carga sobre o objecto.

3.3 – SISTEMA DE SINCRONIZAÇÃO TEMPORAL

A realização de medições de fenómenos dinâmicos rápidos impõe sempre uma correcta sincronização entre os instantes de ocorrência do fenómeno a estudar, os disparos do laser que ilumina o objecto em estudo e o sistema de aquisição de imagens relativas aos diferentes estados de excitação do objecto. Este facto exige que num sistema completo de estudo de fenómenos rápidos exista um circuito electrónico que gere um conjunto de sinais capazes de sincronizar todos os componentes do sistema de medida. Este circuito, Sistema de Sincronização Temporal (SST), deverá ser suficientemente preciso e versátil de forma a permitir utilizá-lo com vários tipos de lasers e em diferentes sistemas de aquisição de imagem. A resolução de 1 μ s é normalmente utilizada na geração destes sinais.

A configuração normalmente utilizada nestes circuitos integra um bloco gerador do sinal de relógio, um bloco receptor do sinal de sincronismo de entrada, um conjunto de blocos contadores e vários circuitos geradores dos sinais de saída. Estes últimos são normalmente ajustados de acordo com as exigências da montagem. Em todos os SST um sinal de entrada comanda um conjunto de dispositivos, através da geração de um conjunto de sinais de atraso.

Embora haja SST's disponíveis comercialmente estes apresentam um elevado custo e um conjunto de funções pouco utilizadas nestas técnicas, dado que são desenvolvidos para um grande número de aplicações. Durante a realização desta tese o LOME decidiu projectar e construir um sistema próprio.

Este sistema de sincronização temporal, baseado num microcontrolador, permite a geração de três sinais, temporizados a partir de um sinal de sincronismo. Permite ainda medir o tempo entre dois sinais exteriores.

Tendo aplicação genérica, foi projectado com o objectivo de sincronizar a aquisição de imagens a partir do sincronismo de um Laser de impulsos, Nd:YAG ou Rubi. Por cada impulso de sincronismo o sistema gera para cada saída um sinal em função dos valores programados. Na figura 3.42 está representado o painel frontal de comando/programação dos sinais temporais.

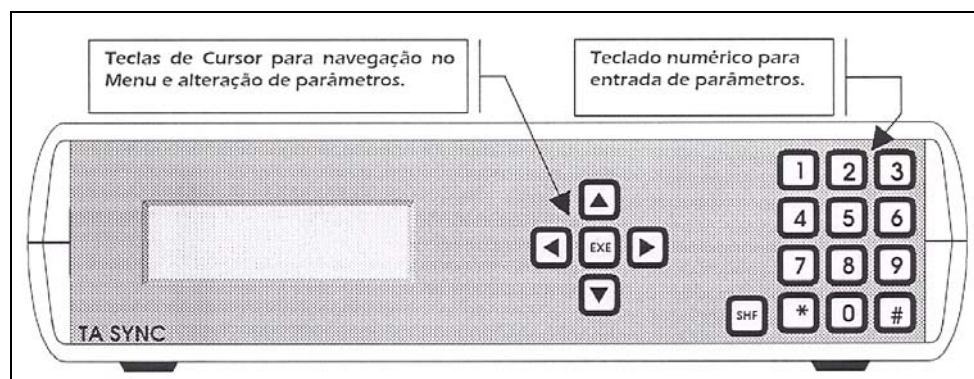


Figura 3.42 - Painel frontal do Sistema de Sincronização Temporal.

O sistema integra vários blocos que são descritos em seguida:

Bloco gerador do sinal de relógio

Aqui, um cristal é posto a oscilar gerando um sinal com uma frequência elevada, que controla a resolução do sistema. Dado que este circuito integra uma EProM, *Erasable Programmable Memory*, que necessita de um sinal de relógio bastante superior à resolução exigida para o circuito, foi decidido utilizar um cristal de 24 MHz. Desta forma foi garantida uma correcta operação da EPROM sem comprometer a resolução final do sistema de geração de atrasos.

Bloco receptor do sinal de entrada

Este bloco recebe o sinal de sincronismo. O sinal pode ter origem no fenómeno, se forem utilizados lasers de Rubi, ou ter origem no laser de Nd:YAG se for este o sistema de iluminação utilizado. No caso da sincronização do laser de Rubi o circuito gerador do sinal de entrada do SST pode ser escolhido para produzir o sinal com a tensão mais conveniente. No caso do laser de Nd:YAG é um sinal proveniente do laser que é utilizado como entrada do SST. Como neste caso se trata de um sinal de 24 V com uma largura de alguns microsegundos foi necessário construir um circuito de isolamento para o transformar num sinal TTL. Este isolamento foi inicialmente realizado por um acoplador óptico que, dada a sua baixa frequência de resposta, foi substituído por um MOSFET.

Bloco dos contadores

Este bloco tem como função gerar um sinal de saída quando o número de ciclos de relógio igualar o tempo programado. Neste caso estão disponíveis três saídas independentes. Um *display* e um teclado, colocados na frente do SST, permitem realizar a sua programação.

Bloco de saída

Este bloco gera o sinal apropriado para despoletar o funcionamento de todos os sistemas que integram a montagem: aquisições da câmara, *shutter* do laser, disparos do laser, ocorrência de impactos, ...

Um sistema laser de Rubi é sempre operado em funcionamento assíncrono. Desta forma é possível utilizar um sinal gerado pelo fenómeno a estudar para desencadear os impulsos laser e a aquisição das imagens. O objecto é o *master* do sistema de sincronização.

A utilização de lasers pulsados de Nd:YAG exige alguns cuidados especiais no que se refere ao sincronismo entre o fenómeno e o registo. Dadas as taxas de repetição destes lasers, neste caso 50 pares de impulsos por segundo, ficam disponíveis vários duplos impulsos em cada segundo. Em consequência, ou se dispõe de sistemas de aquisição rápida de imagem com elevada capacidade de armazenamento ou se aproveitam apenas os impulsos necessários à medição. Dado que durante este trabalho não se dispôs de placas de imagem com elevada capacidade de armazenamento apenas foi implementada a segunda solução. Para isso um dos sinais

de atraso gerado pelo SST foi utilizado para operar um *shutter* mecânico colocado na saída do laser. Neste caso é o laser o *master* do sistema de sincronismo. A excitação do objecto e a aquisição das imagens são, neste caso, comandadas por sinais de atraso gerados pelo SST.

Na figura 3.43 representam-se os principais sinais gerados pelo SST para um sistema de medida baseado no laser de Nd:YAG disponível no LOME. Neste diagrama temporal um sinal de entrada (START) comanda o sistema de acordo com o funcionamento do laser (*Trigger Out*). Este último sinal é utilizado no arranque dos blocos contadores (*count*), a partir dos quais são produzidos os diferentes sinais de atraso. Neste diagrama estão ainda representados o sinal de abertura do *shutter* e o sinal de *trigger out* para controlo da placa de aquisição de imagem.

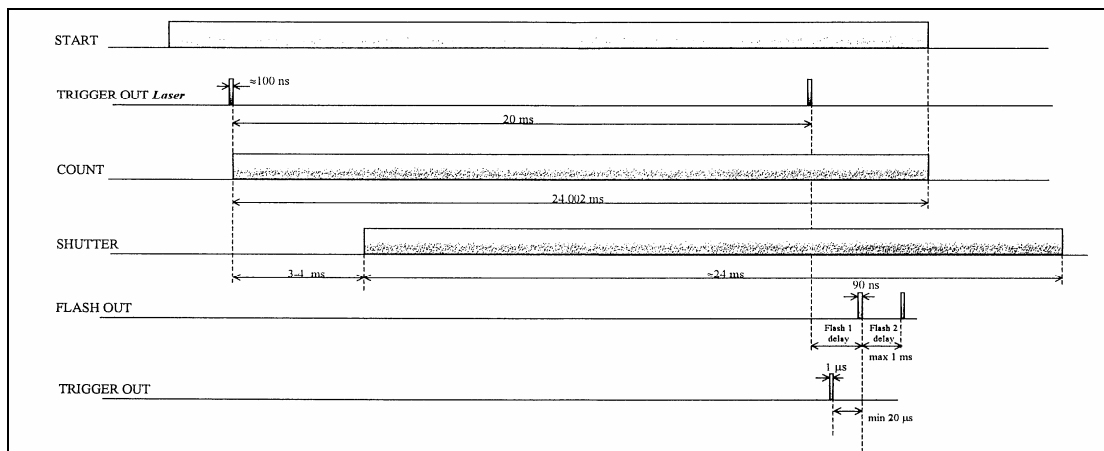


Figura 3.43 – Diagrama temporal do SST / Nd:YAG / SONY para realizar a dupla exposição.

Este circuito foi utilizado com bons resultados com o laser de Nd:YAG e as câmaras SONY XC-8500CE e a KODAK Megaplug ES1.0. Alguns resultados são apresentados no capítulo 6. Embora a concepção do sistema e a montagem do primeiro protótipo tenham sido realizadas no LOME a integração do sistema final, mais compacta e fácil de operar, foi realizado com a colaboração de uma equipa do INESC-Porto. O circuito electrónico deste sistema esta representado na figura 3.44.

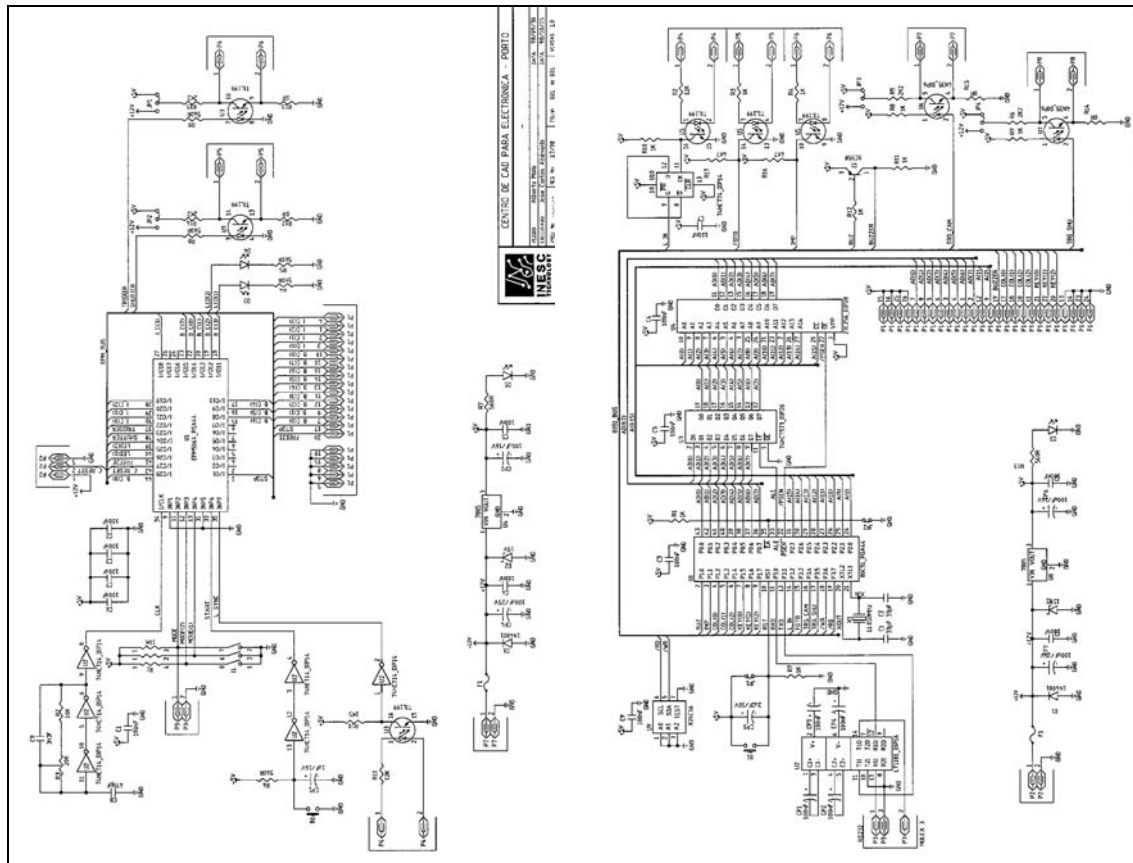


Figura 3.44 – Diagrama electrónico utilizado na realização do sistema de sincronização temporal.

REFERÊNCIAS

- [1] T.Mainman, *Stimulated optical radiation in ruby*, Nature, Vol.187, pág. 493-494, 1960.
- [2] J. Salcedo, *Lasers*, INSEC-N, 1992.
- [3] A.Siegman, *Introduction to Masers and Lasers*, McGraw-Hill, 1971.
- [4] G. Pedrini, P. Froning, H. Fessler and H. Tiziani, "Transient vibration measurement by using multi-pulse digital holography", *Optics & Laser Technology*, Vol. 29, pag. 505-511, 1997,
- [5] J. Hecht, *Understanding lasers, an entry level guide*, IEEE Press, 1993.
- [6] R. Spooren, "Pulsed video speckle interferometry", *PhD. Thesis*, NTH Univ. Trondheim, Noruega, 1992.
- [7] W.Koechner, *Solid state laser engineering*, Springer-Verlag , 1988.
- [8] W. Smith, *Laser applications*, Artech House, Inc Edit., 1970.
- [9] Continuum, NY 81-50 DUAL laser, Manual.
- [10] P. Smigielski, *Holographie Industrielle*, Teckna Ed. 1996
- [11] Pulsed Digital Holography and Shearography, EU project BE95-1147, *Final report*, 1999
- [12] C. Davis, *Lasers and Electro-Optics, Fundamentals and Engineering*; Cambridge Univ. Press, 1996.
- [13] F. Dickey et al, "Gaussian Laser Beam Profile Shaping", *Optical Engineering*, 35 (11), pag. 3285-3295; Nov. 1996.
- [14] K. Nemoto et al. , "Laser Beam Intensity Profile Transformation with a Fabricated Mirror", *Applied Optics*, Vol. 36, nº3; Jan 1997.
- [15] J. Bengtsson, "Kinoform-only Gaussian-to-Rectangle Beam Shaper for a Semiconductor Laser", *Applied Optics*, Vol. 35, nº 20, Jul. 1996.
- [16] A. Leite, "Optical fiber illuminators for holography", *Optics Communications*, Vol. 28, pág. 303-308, 1979.
- [17] J. Monteiro et al, "A miniaturized electronic speckle pattern interferometer", *Mechanics in Design Symposium* 96, Hamilton Ontario, Canada, 7-9 May, 1996.
- [18] G.Keiser, "Optical fiber communications", *McGraw-Hill*, 1989.
- [19] D.Jackson, "Monomode optical fiber interferometers for precision measurements", *Instrument Science and Technology*, Vol. 6, pág. 981-1001, 1985.
- [20] D.Gloge, "Weakly guiding fibers", *Applied Optics*, Vol. 10, pág 2252, 1971.
- [21] J.Midwinter, " Optical fiber for transmission", *Willey Ed.*, 1979.
- [22] G.Eisenstein and D.Vitello, "Chemically etched conical microlenses for coupling single-mode lasers into single-mode fibers", *Applied Optics*, Vol. 21, pág. 3470-3474, 1982.
- [23] H.Honmou, "Optical coupling of laser diode array to singlemode-fiber array with heat-treated hemispherical microlens", *Electronic Letters*, Vol.31, pág. 793-794, 1995.
- [24] J.Santos, T.Newson and D.Jackson, "Electronic speckle-pattern interferometry using single-mode fibers and active fringe stabilization", *Optics Letters*, Vol. 15, pág. 573-575, 1990.
- [25] Steinbichler Optotechnik, Gmbh, "TV-Shearography", 1996.
- [26] T.Dresel, M.Beyerlein and J.Schwider, "Design and fabrication of computer-generated beam-shaping holograms", *Applied Optics*, Vol. 35, pág. 4615-4621, 1996.

- [27] R.Gunther, *Modern optics*, Wiley Ed., 1990.
- [28] L. Ek & K. Biedermann, "Fringe contrast in a system for holographic interferometry with low resolution imaging devices", J. of Physics E: Scientific Instr., Vol 8, pag. 691-696, 1975.
- [29] K. Blair Benson & J. Whitaker, "Television and audio handbook", McGraw-Hill, 1990
- [30] R. Spooren, "Double-pulse subtraction TV-holography using a double pulsed single oscillator Nd:YAG laser; restrictions and possibilities", *SEM-Proc. "Hologram interferometry and speckle metrology"*, Baltimore, USA, 5-8 November 1990.
- [31] Pulsed Digital Holography and Shearography, EU project BE95-1147, 12 months report, 1997
- [32] R. Spooren, "Double-pulse subtraction TV holography", *Optical Engineering*, Vol. 31 pag. 1000-1007, 1992.
- [33] L;Lourenço, H.Shen, A.Krothpalli, "Whole-Field Measurements on an Excited Premixed Flame Using On-Line PIV", *8th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Vol. 1, July 8-11, 1996.

CAPÍTULO 4

CÁLCULO DE FASE E PROCESSAMENTO DE IMAGEM

4.1 – Introdução	4.2
4.2 – Correlação dos padrões de <i>speckle</i>	4.4
4.2.1 – Correlação de padrões de <i>speckle</i> por subtração	4.5
4.3 – Cálculo de fase	4.11
4.3.1 – Técnicas discretas	4.12
4.3.2 – Técnicas de modulação temporal (<i>phase-stepping</i>)	4.14
4.3.3 – Métodos de introdução da modulação de fase	4.19
4.3.4 – Técnicas de modulação espacial	4.21
4.4 – Processamento de imagem	4.30
4.4.1 – Processamento de imagem: aplicações dinâmicas	4.33
4.4.2 – Processamento de imagem (SONY+Pulsar+Pentium32 bits)	4.34
4.4.3 – Processamento de imagem (KODAK+Pulsar+Pentium 32 bits)	4.34
4.4.4 – Placa Matrox e rotinas de Processamento de imagem	4.35
Referencias	4.38

O cálculo da fase óptica das imagens de speckle e o seu pós-processamento é apresentado neste capítulo. Aqui faz-se referência à forma como se podem correlacionar os padrões de speckle obtidos através da interferência de imagens, e como é possível, através das imagens de intensidade obtidas ter-se acesso à fase óptica de uma qualquer frente de onda proveniente de um objecto sob observação.

O cálculo de fase é aqui apresentado através de dois procedimentos distintos: um recorre a técnicas baseadas na codificação da informação numa frequência portadora espacial e outro recorre a uma modulação temporal da fase do interferograma.

As diferentes configurações de hardware utilizadas na aquisição e tratamento de interferogramas são também descritas e discutidas.

4.1 – INTRODUÇÃO

As técnicas ópticas estão cada vez mais a ser utilizadas em ambientes industriais trazendo vantagens significativas no que se refere aos custos de produção e à qualidade dos produtos. Devido a razões de sensibilidade, precisão, ausência de contacto e medida global, os métodos de Interferometria Holográfica, Interferometria de *Speckle*, Moiré e projecção de franjas encontram um interesse cada vez maior, não só em investigações laboratoriais, mas também nas aplicações industriais. Estas aplicações cobrem um vasto campo de interesses que vão do controlo da produção de superfícies ópticas, à optimização do projecto de componentes através da análise de tensões, à metrologia ou ao controlo não-destrutivo de componentes estruturais.

O princípio básico destes métodos consiste na codificação da superfície do objecto através de um padrão de intensidade obtido por projecção incoerente de luz ou na sobreposição coerente (interferometria) de frentes de onda que representam diferentes estados do objecto. Uma propriedade comum a estes métodos é o de produzirem padrões de franjas quando a superfície do objecto é alterada, quer por deformações estáticas, quer por deformações dinâmicas. Nesta tese apenas as técnicas de interferometria serão abordadas.

A Interferometria de *Speckle* permite obter padrões de franjas através da correlação de dois ou mais registos holográficos. Estes padrões de interferência (ou de franjas) são observados sob a forma de variações de intensidade quasi-sinusoidais (franjas) e representam o deslocamento sofrido pela superfície da estrutura em teste entre dois estados diferentes de estimulação. Os métodos de interferometria permitem determinar estas

variações de intensidade (deslocamentos) e são por isso de grande interesse na Mecânica Experimental. As franjas claras e escuras correspondem a pontos de igual variação de fase das frentes de onda, $\Delta\phi$.

Durante muito tempo foram utilizadas emulsões fotográficas para registar os padrões holográficos. No início da década de setenta foi introduzido o registo electrónico dos padrões de interferência. Para isso foi necessário compatibilizar as configurações ópticas de forma a permitir o registo de hologramas em meios de menor resolução. Estas configurações são designadas por interferómetros de *speckle* por necessitarem de uma completa resolução dos padrões de *speckle*. Um padrão de *speckle* está resolvido quando a figura de difracção da abertura do sistema formador de imagem tem uma dimensão idêntica ao *pixel* do fotodetector [1]. Desta forma é possível obter interferogramas de *speckle* à frequência video e visualizá-los num monitor de imagem.

Quando a superfície, sob observação de um sistema interferométrico, se “move”, a distribuição aleatória de fase Φ de uma grande parte dos pontos da superfície passa para $\Phi + \Delta\phi$. À primeira vista, o novo padrão de *speckle* não apresenta alterações particulares no seu aspecto geral mas, a nível microscópico, a maior parte dos *pixels* mudaram de intensidade. Para se concluir acerca deste facto é necessário comparar as distribuições de intensidade dos dois padrões de *speckle*, o inicial (antes da solicitação do objecto) e o final (após a solicitação do objecto). A comparação pode ser feita recorrendo a simples funções de correlação, quer por adição, quer por subtracção. É então que se observam franjas resultantes da correlação entre os dois padrões de *speckle* e que correspondem ao movimento da superfície.

A correlação é uma função que compara, ponto a ponto, dois conjuntos de valores neste caso, a intensidade dos padrões de *speckle*.

Dois tipos principais de correlação são utilizados no campo das técnicas interferométricas:

- a correlação por adição de padrões de *speckle* e
- a correlação por subtracção de padrões de *speckle*.

Estando as franjas de interferência obtidas por correlação associadas ao deslocamento da superfície em estudo estas permitem quantificar este movimento. No entanto, para se determinar o mapa de deslocamentos da superfície do objecto, através da determinação da interfranja, é necessária a cartografia da fase da frente de onda proveniente da superfície do objecto. Assim, a tarefa a resolver pela análise das franjas pode ser definida como a conversão de um padrão de franjas num mapa contínuo de fase, tendo em conta o carácter quasi-sinusoidal da distribuição de intensidade de um tal padrão.

As técnicas de análise de franjas são tão antigas como os próprios métodos interferométricos, mas antes dos finais da década de 70 a análise rotineira de padrões de franjas era feita quase exclusivamente através de métodos manuais. Estes métodos morosos e subjectivos são altamente ineficazes e pouco adaptados à quantificação expedita dos padrões de franjas. A passagem de uma técnica manual e laboriosa, realizada por operadores extremamente qualificados, para uma técnica quase automática está intimamente ligada ao desenvolvimento das tecnologias informáticas modernas. Assim, o desenvolvimento da análise automática de padrões de franjas seguiu de perto o crescimento exponencial das capacidades de processamento de imagem dos computadores. Desta forma foi possível adaptar estas técnicas às necessidades da indústria.

A análise automática de padrões de franjas, desenvolvida no início da década de 80, passou então a ser considerada como um tema de investigação autónomo. Vários grupos de investigação participaram nestes desenvolvimentos, de entre eles pode destacar-se o grupo de investigadores do LOME. Este grupo tem acompanhado o desenvolvimento das técnicas de processamento de imagem para esta aplicação tendo produzido programas de análise de imagem para processamento de padrões obtidos por interferometria [2].

Diferentes rotinas foram desenvolvidas para o tratamento de padrões interferométricos com vista à obtenção de mapas de fase. Duas técnicas foram utilizadas para este fim durante esta tese: as técnicas temporais, baseadas em *phase-shift* e as técnicas espaciais baseadas no cálculo de FFT.

Para além das técnicas de cálculo de fase, possibilitadas pelo desenvolvimento da informática, também o pós-processamento de imagem é uma parte importante no que se refere à interpretação dos padrões de interferência. Assim, após a obtenção dos mapas de fase, a aplicação de algoritmos de filtragem é frequentemente utilizada. Diversos aspectos destes algoritmos de filtragem são aqui abordados. Para além disso, como a fase é dependente de uma função arctg, a desmodulação ou *unwrapping* é uma etapa necessária para a obtenção de um mapa de variação contínua. Só agora, pela determinação da interfranja, se pode quantificar o campo de deslocamentos da superfície do objecto.

No que diz respeito ao *hardware* também existiu um importante desenvolvimento ao longo das últimas décadas. Dos sistemas de processamento iniciais, lentos e volumosos, passou-se para placas directamente montadas nos barramentos dos computadores pessoais que utilizam a placa de vídeo para visualização das imagens. O recurso a DSPs permite mesmo que operações envolvendo grandes volumes de cálculo, de que as FFTs são exemplo, possam ser realizadas em tempo real.

4.2 - CORRELAÇÃO DOS PADRÕES DE *SPECKLE*

Sempre que uma superfície com rugosidade superior ao comprimento de onda da luz é iluminada por uma radiação coerente origina um padrão de *speckle*. Este padrão de *speckle*, designando por objectivo, pode ser registado através de um sistema óptico dando origem a um padrão subjectivo, pois é condicionado pelas características geométricas do sistema formador de imagem. Se a um padrão de *speckle* obtido desta forma for sobreposto um outro padrão coerente, ou uma frente de onda com uma distribuição constante de fase, forma-se um outro padrão contendo informação de fase. Estes padrões de *speckle* são designados por padrões de interferência primária e não apresentam qualquer informação visual relevante devido à presença de uma fase aleatória característica do fenómeno de *speckle*.

Da correlação de dois padrões de *speckle* primários, sendo um registado antes de uma deformação e outro após a deformação, obtém-se um padrão de interferência secundário. O padrão resultante contém uma informação de fase devida às alterações verificadas na superfície do objecto sobreposta à variação aleatória de fase.

Os métodos de determinação de fase na interferometria por correlação de *speckle* baseiam-se no facto de que quando um objecto se desloca altera a fase do *speckle*. Sendo possível medir a fase entre duas posições finitas o posicionamento do objecto pode ser rigorosamente determinado.

As franjas secundárias contêm a informação relevante sobre o objecto. Estas franjas começaram por ser obtidas por adição, sendo os primeiros interferogramas obtidos em *time-average* e filtragem electrónica. Com o surgimento dos primeiros sistemas de processamento de imagem, a subtracção tornou-se numa forma alternativa de conseguir franjas secundárias, permitindo melhorar significativamente o contraste dos interferogramas. Isto deve-se sobretudo à eliminação do termo de autocorrelação (invariável com a deformação do objecto) ao efectuar-se a subtracção das duas imagens.

Apesar de apresentar resultados com mais ruído e com um contraste inferior a correlação por adição foi utilizada durante muito tempo no estudo de fenómenos rápidos. Quando é necessário utilizar este tipo de correlação recorre-se à filtragem electrónica para remoção do termo invariante. Actualmente com o aparecimento de CCD's de dupla-exposição assíncrona, esta necessidade deixou de existir. Na verdade estes novos CCD's permitem que a correlação por subtracção se possa efectuar mesmo no estudo de fenómenos rápidos.

4.2.1 – CORRELAÇÃO DE PADRÕES DE SPECKLE POR SUBTRACÇÃO

Considerando uma configuração de Interferometria de *Speckle* (Holografia-TV) é fácil quantificar a intensidade de cada *pixel* do detector de CCD após a sobreposição de duas frentes de onda. Supondo que a lente de imagem foca no alvo CCD a intensidade de cada *pixel* pode ser considerada proporcional à intensidade de cada ponto imagem da superfície do objecto.

Através de considerações teóricas elementares [3], a amplitude complexa dos dois campos eléctricos interferem num dado ponto (x, y) do plano do CCD adicionando-se. A intensidade do sinal é proporcional ao quadrado da amplitude e obtida a partir de:

$$I = |E|^2 = E \cdot E^* \quad (4.1)$$

onde E^* representa o valor complexo conjugado da amplitude de campo, E .

Pode então, a partir desta equação, obter-se a intensidade luminosa de cada *pixel* no plano do detector CCD.

$$\begin{aligned} I &= E_1^2 + E_2^2 + 2 E_1 E_2 \cos(\Phi) \\ \text{ou} \\ I &= I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi) \end{aligned} \quad (4.2)$$

com $\Phi = \varphi_2 - \varphi_1$. Sendo φ_2 e φ_1 as fases relativas de cada uma das frentes de onda que interferem.

A intensidade varia, então, entre dois valores extremos:

$$\begin{aligned} I_{max} &= E_1^2 + E_2^2 + 2 E_1 E_2 \\ I_{min} &= E_1^2 + E_2^2 - 2 E_1 E_2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

O valor médio I_0 é igual a $I_1 + I_2$.

Da interferência das duas frentes de onda coerentes resulta uma terceira cuja amplitude média é a soma das amplitudes de cada uma das frentes de onda e cuja fase é a diferença de fase entre as frentes de onda iniciais. Fazendo uso do conceito de visibilidade das franjas, ou modulação (M), pode deduzir-se a equação de intensidade de cada pixel de uma forma diferente, isto é:

$$M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{2 E_1 E_2}{I_0} \quad (4.4)$$

$$I = I_0 (1 + M \cos(\Phi))$$

A intensidade em cada ponto é função da intensidade média (*background intensity*), da modulação e da fase. Cada um destes parâmetros é variável de acordo com as suas coordenadas. A equação deve então, apresentar-se sob a seguinte forma:

$$I_{(x,y)} = I_{0(x,y)} (1 + M_{(x,y)} \cos(\Phi_{(x,y)})) \quad (4.5)$$

A interferência que ocorre no plano do CCD é registada. A este registo do padrão de *speckle* corresponde a posição da superfície num dado instante. Se o objecto sofrer uma deformação o padrão de *speckle* será alterado a nível microscópico. Este segundo padrão de *speckle* pode ser registado e posteriormente correlacionado com o anterior.

Na figura 4.1 apresenta-se esquematicamente a forma de obtenção de padrões de franjas através da correlação por subtracção de dois padrões de *speckle* registados electronicamente. Neste parágrafo apenas será tratado o caso da correlação por subtracção, o caso mais corrente quando se utiliza o registo electrónico dos padrões de *speckle*.

O primeiro padrão de *speckle*, designado de referência, é digitalizado e armazenado na memória da placa de aquisição. O segundo padrão de *speckle* é digitalizado após a solicitação do objecto. O resultado da subtracção, uma distribuição de intensidade, é convertido num sinal analógico ou digital e enviado para um monitor. À medida que o objecto se deforma as imagens vão sendo processadas e subtraídas à imagem inicial, mostrando o ecrã um padrão de franjas a evoluir temporalmente. As franjas correspondem a contornos com igual variação de fase Φ .

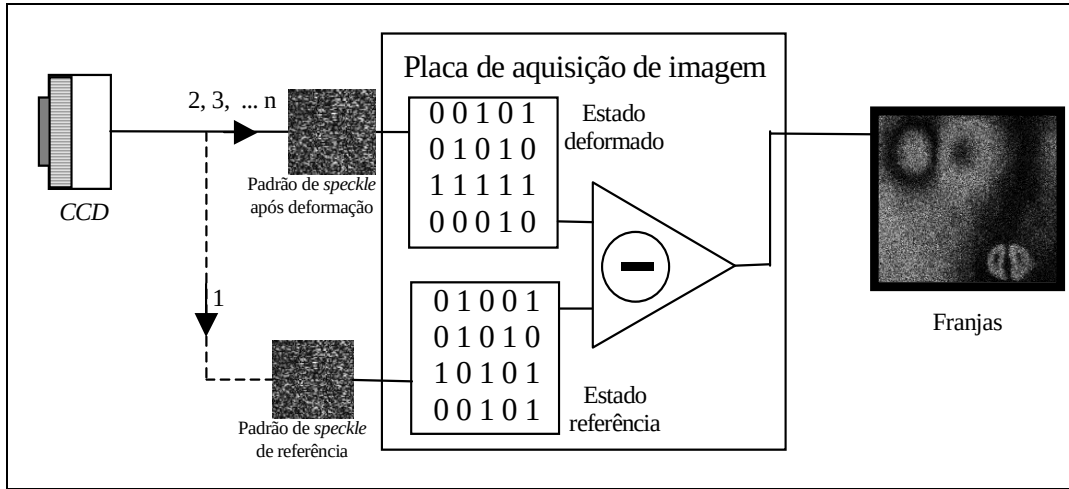


Figura 4.1 – Obtenção de padrões de interferência secundários por subtração de padrões de *speckle* primários.

Quando $\Delta\phi = 2n\pi$ (n , inteiro) as intensidades finais e iniciais são próximas e por isso a intensidade resultante apresenta um valor baixo ou igual a zero, o que resulta numa franja escura. Quando $\Delta\phi = (2n+1)\pi$ (n , inteiro) a subtração resultante apresenta um valor elevado e uma franja clara pode ser vista. Os pontos escuros no interior de franjas claras são devidos ao ruído de *speckle* estando alguns deles substituídos de qualquer modulação.

Padrões de franjas obtidos por subtração

Considerando dois instantes, 0 e t , do estado de um objecto, pode escrever-se a equação que representa o padrão de *speckle* da interferência de duas frentes de onda como:

$$I^0 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi) \quad ; \quad \Phi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad \text{speckle da referência}$$

$$I^t = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi + \Delta\phi) \quad ; \quad (\Phi + \Delta\phi) = \varphi_2 - \varphi_1 \quad \text{novo speckle}$$

Tendo em conta que a deformação do objecto originou uma alteração da fase da luz, então o valor a determinar é a variação de fase $\Delta\phi$, devida ao deslocamento, entre o instante 0 e t . Considerando que apenas a fase varia de Φ a $\Phi + \Delta\phi$, entre os dois estados do objecto (I_0 e I_t mantêm-se constantes), pode obter-se uma equação que exprime a subtração dos dois padrões de *speckle*.

$$\begin{aligned} \Delta I = I^0 - I^t &= (I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi)) - (I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi + \Delta\phi)) \\ &= 4\sqrt{I_1 I_2} \left[\sin\left(\Phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right] \end{aligned} \quad (4.6)$$

Nesta última expressão existem dois termos em seno. Sendo o primeiro, um sinal de alta frequência $\sin(\Phi + \Delta\phi/2)$, modulado pelo segundo, um sinal de baixa frequência $\sin(\Delta\phi/2)$. Desta forma, as franjas

obtidas contêm *speckle*. Isto é verificado através da observação de uma ampliação de um padrão de franjas como o da figura 4.2.

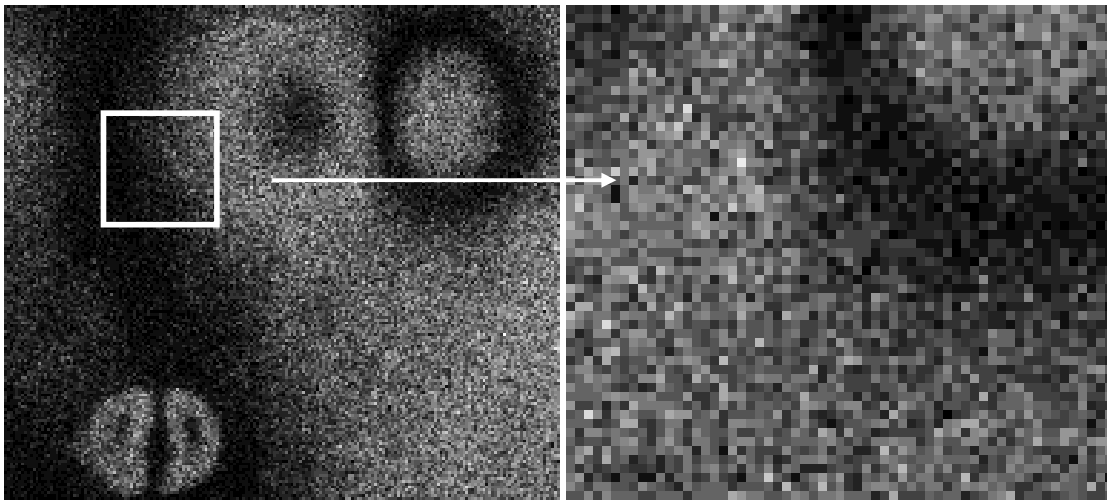


Figura 4.2 – Ruído de *speckle* nas franjas secundárias.

A fase do *speckle* Φ varia aleatoriamente por toda a imagem e é, por isso, um sinal com uma elevada frequência espacial. Por exemplo, para uma imagem de 1024×1024 pixel pode atingir $f_{\max} = 512$. Por outro lado, $\Delta\phi$ é a grandeza que pretendemos determinar através da medida interferométrica, ou seja, o padrão de franjas que corresponde aos micro-deslocamentos da superfície. Estes só são realmente mensuráveis enquanto a sua frequência espacial, que é essencialmente um sinal de baixa frequência, for bastante inferior à frequência espacial do *speckle*. Por exemplo para uma imagem de 1024×1024 pixel $f_{\max}$ observável na prática é de aproximadamente 60 franjas.

À medida que aumenta o deslocamento, mais franjas aparecem no monitor. Este valor não pode, contudo, ser tão elevado como o sinal de alta-frequência do *speckle* Φ pois os dois sinais seriam indistinguíveis. É este o limite em termos de resolução espacial da técnica.

Rectificação por subtracção

É de esperar que para alguns *pixels* do padrão de franjas o resultado da subtracção seja negativo. No entanto, o monitor P/B apenas é capaz de mostrar valores positivos da função brilho, pelo que o sinal amostrado será cortado. Para se ultrapassar este problema, o resultado da subtracção deve ser rectificado. Existem duas possibilidades para realizar a rectificação do sinal vídeo após a subtracção, ou se utiliza um circuito electrónico rectificador ou se recorre a processamento digital do sinal vídeo. Dadas as capacidades das placas de imagem actuais a segunda possibilidade é de longe de mais fácil implementação. Neste caso, duas formas diferentes para obter apenas resultados com valores positivos, podem ser utilizadas; ou calculando o valor absoluto ou elevando ao quadrado o resultado da subtracção. Ambas as operações podem ser realizadas pelos

processadores das placas de imagem, no entanto, recorrendo à programação das tabelas de conversão de níveis de cinzento (LUT – *Look-Up Table*) pode obter-se uma solução mais rápida.

- o valor absoluto, $y=|x|$, é facilmente alcançado utilizando uma LUT em V centrada no ponto zero, neste caso todos os valores negativos são convertidos em positivos;
- rectificação do sinal pode também ser obtida pelo quadrado da equação 4.6 e neste caso a LUT será programada por forma a obter $y=x^2$.

O sinais obtidos antes e após rectificação são apresentados no gráfico da figura 4.3. O sinal resultante da subtracção é representado a vermelho, $y=|x|$ e $y=x^2$ são representado a azul e preto, respectivamente.

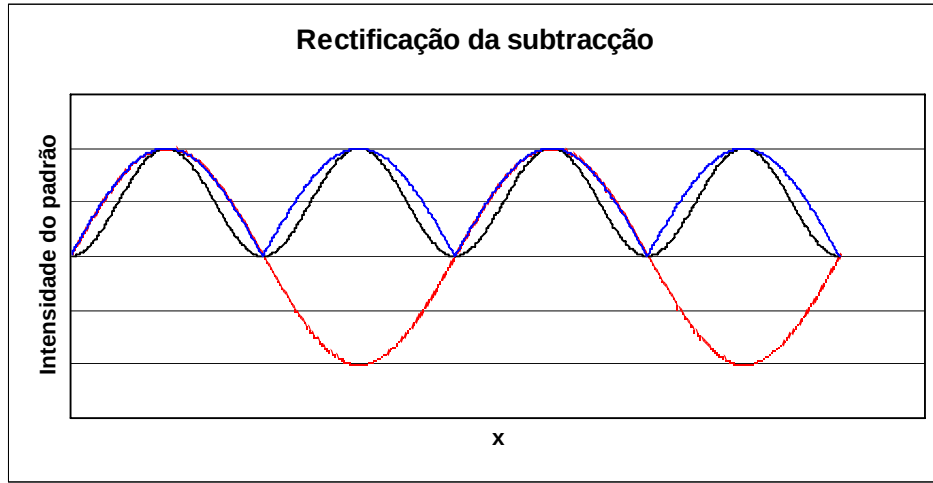


Figura 4.3 – Rectificação do sinal obtido da correlação de padrões de speckle, representado a vermelho. A preto sinal obtido pelo quadrado e a azul sinal obtido pela determinação do módulo.

O valor médio de uma distribuição uniforme de Φ sobre um ciclo $[0, \pi]$ é igual a $2/\pi$. Ao efectuar a média de várias imagens substitui-se a função aleatória pelo seu valor médio. Assim, após a determinação do valor médio e da rectificação a equação 4.6 toma a forma:

$$\begin{aligned}
 \langle \Delta I \rangle &= \langle I_0 - I_t \rangle = \left\langle 4 \sqrt{I_1 I_2} \right\rangle \left\langle \left| \sin \left(\Phi + \frac{\Delta \phi}{2} \right) \right| \right\rangle \left| \sin \left(\frac{\Delta \phi}{2} \right) \right| \\
 &= \left\langle 4 \sqrt{I_1 I_2} \right\rangle \frac{2}{\pi} \left| \sin \left(\frac{\Delta \phi}{2} \right) \right| = \frac{4}{\pi} \langle I_M \rangle \left| \sin \left(\frac{\Delta \phi}{2} \right) \right| \\
 \langle \Delta I \rangle &= \frac{\sqrt{8}}{\pi} \langle I_M \rangle \left| \sqrt{1 - \cos \Delta \phi} \right|
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

O sinal rectificado através de uma função quadrática tem características semelhantes ao anterior mas uma forma ligeiramente diferente. O valor médio de Φ para uma função $\sin^2$ sobre um ciclo $[0, 2\pi]$ é igual a $1/2$. Assim, a equação 4.6, após a determinação do valor médio e da rectificação toma a forma:

$$\begin{aligned}
 \langle \Delta I \rangle^2 &= \left[\langle I_0 - I_t \rangle \right]^2 = \left[\left\langle 4 \sqrt{I_1 I_2} \right\rangle \left\langle \sin \left(\Phi + \frac{\Delta \phi}{2} \right) \right\rangle \left| \sin \left(\frac{\Delta \phi}{2} \right) \right| \right]^2 \\
 &= 4 \langle I_M^2 \rangle \frac{1}{2} \sin^2 \left(\frac{\Delta \phi}{2} \right) \\
 \langle \Delta I \rangle^2 &= \langle I_M^2 \rangle (1 - \cos \Delta \phi)
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

De acordo com a rectificação utilizada, o padrão de franjas depende do valor da fase através das equações 4.7 e 4.8. A diferença existente entre as duas equações não é importante, pois a ambas corresponde igual espaçamento de franjas e igual distribuição de fase.

A rectificação do sinal é uma operação extremamente útil se a observação em tempo-real das franjas de correlação é necessária. Este é o caso prático das inspecções por *shearography, on-site*, onde apenas a observação em tempo-real da deformação do objecto permite a correcta interpretação da imagem interferométrica.

A interpretação das imagens interferométricas em termos de mapas de fase é tratada no parágrafo seguinte, pois o cálculo de fase não necessita da rectificação do sinal. Embora a fase possa conter valores negativos, a sua conversão num mapa de intensidade permite utilizar toda a gama dinâmica da placa de imagem evitando valores inferiores a zero. Para além disso, deve referir-se que a rectificação do padrão de franjas altera o sinal sinusoidal existente. Assim, não é possível utilizar no cálculo de fase padrões de *speckle* rectificados.

De acordo com a equação 4.5, a intensidade de um pixel no padrão de franjas pode ser sintetizada como a soma algébrica de um termo de intensidade de fundo com um termo de modulação. Esta modulação conduz a níveis de cinzento que raramente se situam fora da gama 0 – 50. A amplificação da intensidade é necessária. Assim, para se utilizar toda a gama dinâmica de níveis de cinzento, entre 0 e 255 (8 bits), pode alterar-se a inclinação das LUT's, como se mostra na figura 4.4. Desta forma pode melhorar-se a observação dos padrões de franjas em tempo-real.

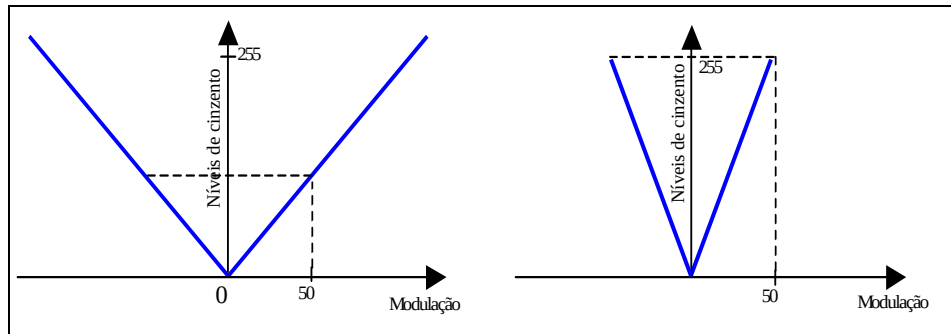


Figura 4.4 – Programação da LUT de feedback para aumentar a visibilidade de franjas com fraca modulação.

Para além de permitir um melhor contraste das franjas de interferência, a correlação por subtração pode conduzir à possibilidade de observar em tempo real (frequência video) a deformação da superfície de um

objecto. Para isto ser possível, a placa de aquisição de imagem deve dispôr de uma LUT de *feedback* e um módulo aritmético, como se apresenta na figura 4.5. Durante este trabalho as placas de aquisição utilizadas continham esta função.

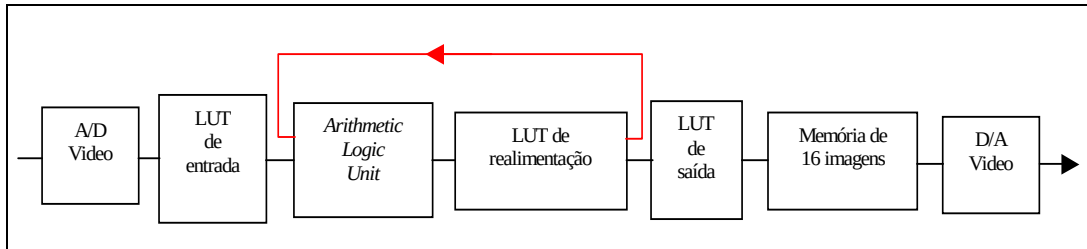


Figura 4.5 – Diagrama de blocos de um sistema de processamento de imagem que realiza subtração em tempo-real.

Para além dos módulos de conversão A/D e D/A e das tabelas de conversão vídeo de níveis de cinzento (LUT's), disponiveis em todas as placas de aquisição de imagem, a existência de uma re-alimentação entre a saída da placa de aquisição de imagens e a LUT de entrada aumenta a versatilidade do sistema. Desta forma, a adição de um módulo aritmético (ALU - Arithmetic Logic Unit) permite que as operações entre diversas imagens sejam realizadas em tempo-real. A imagem que acaba de ser adquirida pode ser armazenada num *buffer* para ser comparada com as novas imagens que chegam. A precisão destas operações é actualmente limitada a 10 bits devido ao facto de serem realizadas em tempo-real.

4.3 – CÁLCULO DE FASE

A grandeza fundamental na interferometria óptica é a fase das franjas que contém a informação sobre o deslocamento ou deformação do objecto. Durante as duas últimas décadas, acompanhando o desenvolvimento dos sistemas de processamento de imagem, várias técnicas de avaliação automática da fase dos padrões de franjas foram desenvolvidas:

- Técnicas de discretização ou *fringe tracking*
- Técnicas temporais ou de *phase-stepping*
- Técnicas espaciais ou baseadas no cálculo de *Fast Fourier Transform*.

Todas estas técnicas apresentam vantagens e inconvenientes, por isso, os critérios de decisão dependem das condições particulares de cada aplicação.

Apesar do método de discretização ser extremamente moroso e estar sujeito a problemas de solução não-trivial é por vezes a única alternativa à avaliação das franjas. A sua vantagem advém do facto de funcionar relativamente bem em casos de padrões de franjas de bom contraste e de não necessitar de dispositivos de modulação de fase ou de manipulação das frentes de onda.

As técnicas mais aceites envolvem no entanto o cálculo da fase em cada ponto (*pixel*) do padrão de interferência. Alterações introduzidas num dos braços do interferómetro permitem realizar estes cálculos. Num dos casos recorre-se à translação das franjas introduzindo variações de fase conhecidas, no outro, uma rotação numa das frentes de onda gera uma frequência portadora espacial que é modulada pelo sinal que se deseja calcular. Neste último caso o cálculo por Transformada de Fourier permite isolar o termo com sinal e obter a sua distribuição de fase.

Considerando estas duas últimas técnicas de cálculo de fase é possível reescrever a equação 4.5 da intensidade do padrão de interferência em cada ponto de uma forma mais generalizada:

$$I_{(x,y)} = I_{o(x,y)} \left(1 - M_{(x,y)} \cos(\Phi_{(x,y)} + 2\pi f_o r + \alpha_i) \right) \quad (4.9)$$

Nesta expressão o argumento da função cosseno contém informação que permite obter as várias incógnitas recorrendo a algoritmos baseados nas técnicas anteriormente referidas. Enquanto o primeiro termo diz respeito a fase do sinal de interesse o segundo descreve uma portadora espacial e o último diz respeito a uma fase constante introduzida por alteração do comprimento de um dos braços do interferómetro.

4.3.1 – TÉCNICAS DISCRETAS

As primeiras tentativas de automatização das medições quantitativas com holografia foram feitas através de técnicas de *fringe tracking*. Nesta abordagem do problema foram desenvolvidas rotinas para detectar o centro das franjas, rotinas de erosão que reduzem as franjas a linhas (esqueleto) e rotinas de seguimento que acompanham as franjas ao longo do seu comprimento. No LOME foram já implementadas algumas destas rotinas na análise de padrões de franjas [4].

Na obtenção dos esqueletos dos padrões de franjas além das técnicas de erosão podem ser utilizadas as técnicas de detecção de mínimos. Esta técnica é menos sensível à orientação das franjas embora a combinação de ambos os métodos seja a melhor solução. Em qualquer dos casos é sempre necessário dispôr de bons algoritmos de filtragem, dado que a presença do *speckle* dificulta muito a aplicação destas técnicas.

A combinação destes métodos num sistema automático de *fringe tracking* é agora apresentada. Deve referir-se que o objectivo destes algoritmos consiste na identificação do centro de cada franja. Considere-se uma imagem de amplitude, como a representada na figura 4.6a) e que pode ser expressa matematicamente por:

$$I_{(x,y)} = I_{o(x,y)} \left(1 - M_{(x,y)} \cos(\Phi_{(x,y)}) \right) \quad (4.10)$$

Para aumentar a precisão na determinação das linhas de centro, o interferograma deve ser **normalizado**. Isto implica correcções das variações espaciais da intensidade do fundo e da modulação de intensidade através de rotinas de processamento de imagem. Em seguida a **binarização**, figura 4.6b) é aplicada, criando uma imagem binária do padrão de franjas. Esta função é de uma importância crucial para o bom resultado desta

técnica e pode dividir-se em duas fases, a segmentação e a determinação da orientação das franjas. A segmentação pretende materializar a análise que o olho humano faz em presença de um padrão interferométrico, em que o interferograma é interpretado como um perfil de intensidades com uma sequência de picos, declives e vales. A segmentação aplica um operador diferencial que fornece os melhores candidatos a vales e a picos. Destas operações resultam duas imagens, contendo uma a distribuição espacial da orientação das franjas e a outra informação sobre as regiões da imagem que respeitam a vales, picos, declives e zonas desconhecidas.

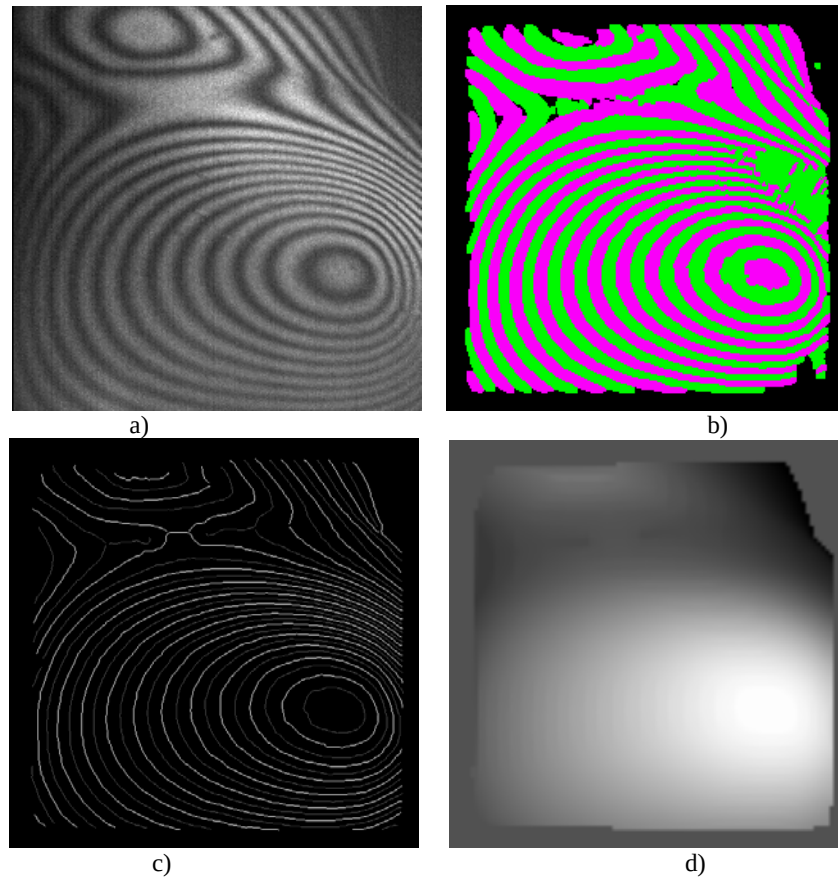


Figura 4.6 – a) Interferograma, b) Binarização c) Esqueletização d) Interpolação e cartografia pseudo 3D [doc BIAS].

A partir dos resultados da segmentação, a operação **esqueletização**, figura 4.6c) fornece um padrão de linhas que é uma estimativa das posições das intensidades extremas no interferograma. A determinação da ordem relativa das franjas necessita o conhecimento prévio do declive da fase a partir do qual se realiza a numeração das franjas. Finalmente uma **interpolação** – *surface fit* – é realizada para a determinação dos valores de fase nos pontos entre essas linhas, ver figura 4.6d).

As técnicas discretas de análise de padrões de franjas são normalmente pesadas em termos computacionais e eliminam grande parte da informação presente nos padrões de franjas originais. Sendo a informação inicial contínua o resultado final corresponde a um conjunto de linhas que caracteriza as várias franjas. A obtenção

de valores intermédios implica a utilização de interpolações com a consequente introdução de erros. Uma outra fonte de erros poderá ser uma incorrecta numeração das franjas pelo operador.

Por último deve referir-se que todos os algoritmos desenvolvidos para análise discreta dos padrões de interferência são fortemente afectados pela presença de ruído nas imagens. No caso de imagens ruidosas o sucesso das medições realizadas com estas técnicas é fortemente dependente da qualidade dos algoritmos de filtragem disponíveis. De tudo isto resulta que estes algoritmos são de difícil aplicação a imagens contendo *speckle* pelo que são mais utilizados em imagens de Interferometria Holográfica, de Moiré e de Fotoelasticidade.

4.3.2 – TÉCNICAS DE MODULAÇÃO TEMPORAL (PHASE-SHIFTING)

Estas técnicas apresentam como principal vantagem o facto de o cálculo de fase ser realizado ponto a ponto sem qualquer propagação espacial de erros. Neste caso o cálculo da fase implica a determinação das três incógnitas que figuram na equação 4.10, ou seja a intensidade média I_0 , a modulação das franjas M e a diferença de fase $\Delta\phi$. Isto é alcançado através do registo das intensidades de cada pixel obtidas após adicionar pelo menos 3 fases conhecidas e constantes a toda a imagem. O padrão de interferência devido ao fenómeno em análise deverá permanecer constante durante a gravação das imagens o que implica uma grande estabilidade de toda a envolvente da medida. Sendo assim esta técnica é mais adaptada para a medição de fenómenos quasi-estáticos. No entanto, a utilização de várias câmaras CCD para registar o mesmo fenómeno e acompanhadas por dispositivos de atraso da frente de onda permite a utilização das técnicas de modulação temporal de fase a fenómenos rápidos [5]. O principal inconveniente desta solução é o preço e a complexidade do ajuste posicional dos detectores do sistema.

Para aplicação destas técnicas foram propostas várias soluções, envolvendo 3 ou mais interferogramas, de acordo com a aplicação em causa. Estes algoritmos conduzem a resultados de maior ou menor sensibilidade ao erro introduzido na aplicação da modulação de fase [6].

A técnica de *phase-shift*, ou *phase-step*, baseia-se na reconstrução da fase $\Phi(x, y)$ através da amostragem de um conjunto de padrões de franjas que diferem entre eles de um certo valor de fase discreto α . Se α é alterado, temporalmente em n etapas – *steps* – de um valor α_0 , então, n distribuições de intensidade $I_n(x, y)$ são obtidas em cada ponto do padrão de franjas. Partindo da equação 4.11, cada padrão de franjas terá a seguinte forma:

$$I_{n(x, y)} = I_{o(x, y)} (1 - M_{(x, y)} \cos(\Phi_{(x, y)} + \alpha_n)) \quad (4.11)$$

em que α_n é um incremento de fase imposto e, por isso, conhecido. Assim, a obtenção de diferentes padrões de intensidade, por variação do valor de fase α_n , permite a determinação das incógnitas presentes na equação 4.11.

Em geral apenas 3 padrões interferométricos são necessários para determinar as três incógnitas da equação: $I_0(x,y)$, $M(x,y)$ e $\Phi(x,y)$. Contudo, com $m > 3$ é possível obter equações com menor sensibilidade aos erros introduzidos na imposição de fase. Se os valores da fase α_n forem distribuídos equidistantemente e aproveitadas as relações de ortogonalidade das funções trigonométricas pode obter-se uma grande simplificação dos cálculos.

Métodos com 2 Imagens

Este método foi sugerido por Santoyo *et al.* [7] e recorre à estimativa da intensidade de fundo através da análise espectral do sinal. Não se pode considerar um método de determinação de fase muito fiável, pois é extremamente difícil isolar com precisão o termo médio numa imagem de interferometria. Por outro lado, o método só pode ser aplicado a franjas secundárias, onde existem duas frequências bem distintas, uma vez que, nas franjas primárias de origem *speckle*, a informação encontra-se espalhada por todo o espectro de frequências.

Para a aplicação deste método, são necessárias duas imagens com um desfasamento relativo de $\pi/2$. Cada uma das imagens é então transformada através de uma FFT, de modo a obtermos o seu conteúdo espectral. A filtragem permite então eliminar o termo de fundo e, ao mesmo tempo, efectuar uma filtragem passa-baixo. As duas imagens assim obtidas serão da forma:

$$\begin{aligned} I_0 &= -I_V \cos \phi \\ I_{90} &= -I_V \sin \phi \end{aligned} \tag{4.12}$$

A partir destas duas imagens, a fase pode ser obtida calculando:

$$\Delta \phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_{90}}{I_0} \right) \tag{4.13}$$

A qualidade do método decresce quando se aumenta a deformação e, por consequência, o número de franjas. Os erros são praticamente irrecuperáveis pois um algoritmo de desembrulhar a fase dificilmente consegue superar a quantidade de erros existente. O método pode contudo ter aplicação, com as limitações referidas, nos casos em que só se dispõe de franjas secundárias e em que o menor número possível de imagens deve ser adquirido. Esta situação pode acontecer em ambientes de grande instabilidade das montagens.

Métodos com 3 Imagens

Para que a determinação de fase ou, por outras palavras, a reconstrução da frente de onda seja um processo fiável, é necessário um mínimo de três imagens do padrão de franjas. É assim possível reconstruir a frente de onda usando por exemplo $\alpha_1 = \pi/4$, $3\pi/4$, e $5\pi/4$. A partir da intensidade medida nos três interferogramas é possível determinar a fase em cada elemento do detector do seguinte modo:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_{225} - I_{135}}{I_{45} - I_{135}} \right) \quad (4.14)$$

Alternativamente pode usar-se $\alpha_i = 0, \pi/2$, e π , obtendo-se neste caso [2]:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_{180} - I_{90}}{I_0 - I_{90}} \right) - \frac{\pi}{4} \quad (4.15)$$

Se for usado um passo de fase mais geral, a solução do sistema de equações dará, no caso de $\alpha_i = -\alpha, 0, \alpha$:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot \frac{I_{-\alpha} - I_{\alpha}}{2I_0 - I_{-\alpha} - I_{\alpha}} \right) \quad (4.16)$$

Uma expressão de cálculo frequentemente utilizada recorre a degraus de fase de $2\pi/3$ e, neste caso, virá:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\sqrt{3} \cdot \frac{I_{-120} - I_{120}}{2I_0 - I_{-120} - I_{120}} \right) \quad (4.17)$$

Métodos com 4 Imagens

Dos métodos usados na determinação da fase por *phase stepping* o mais comum é o de quatro imagens com degraus de fase de $\pi/2$. Neste caso são usadas as quatro imagens mostradas na figura 4.7 e a expressão de cálculo é da forma:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_{270} - I_{90}}{I_0 - I_{180}} \right) \quad (4.18)$$

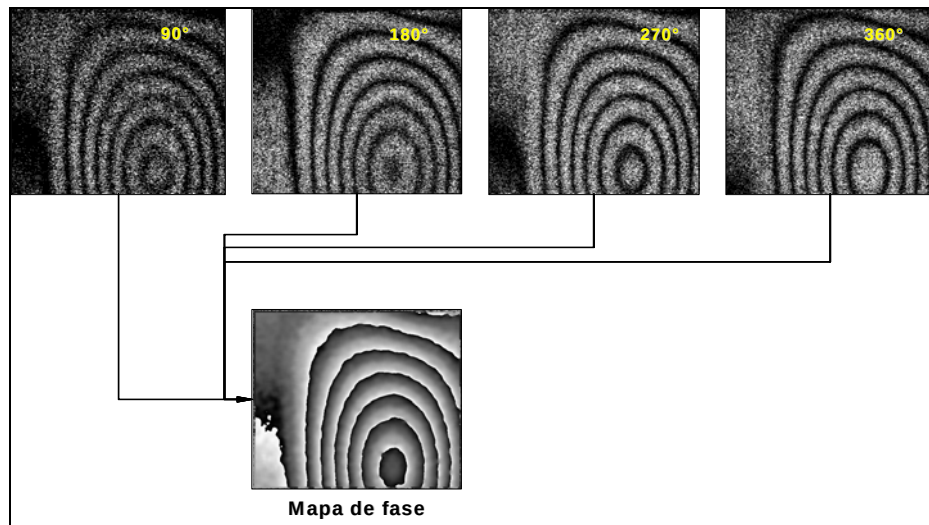


Figura 4.7 – Obtenção de um mapa de fase a partir de 4 padrões de *speckle* secundários.

É possível usar outras expressões com diferentes degraus de fase, mas esta expressão é praticamente universal no caso do uso de quatro imagens. Este algoritmo apresenta menor sensibilidade aos erros introduzidos na imposição da fase conhecida, situação frequente quando não se conhece com rigor o comportamento dinâmico do dispositivo de modulação de fase. Deve referir-se que no sentido de diminuir a influência da instabilidade da montagem a aquisição das imagens deve ser realizada o mais rápido possível.

Método Carré

No método de quatro imagens, tendo em conta que o número de incógnitas para cada ponto é três (I_M , I_V e ϕ), pode ser utilizada a equação excedente para obter o próprio *phase-shift* (α). Deixa de ser necessária a calibração do *phase-shift*, sendo por isso a formulação independente do seu valor. Este método deve-se, como a sua designação indica, a Carré [8]. No caso de serem usados interferogramas com degraus de fase $\alpha_i = -3\alpha/2, -\alpha/2, \alpha/2$, e $3\alpha/2$, o *phase-shift* e a fase podem ser calculados através das seguintes expressões:

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \sqrt{\frac{3(I_{-\alpha/2} - I_{\alpha/2}) - (I_{-3\alpha/2} - I_{3\alpha/2})}{(I_{-\alpha/2} - I_{\alpha/2}) + (I_{-3\alpha/2} - I_{3\alpha/2})}} \quad (4.19)$$

e

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\tan \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{(I_{-3\alpha/2} - I_{3\alpha/2}) + (I_{-\alpha/2} - I_{\alpha/2})}{(I_{-\alpha/2} + I_{\alpha/2}) - (I_{-3\alpha/2} + I_{3\alpha/2})} \right) \quad (4.20)$$

Normalmente o método convencional de quatro imagens é o utilizado; contudo existe uma situação em que o método Carré apresenta vantagens óbvias: quando o feixe modulado é convergente ou divergente, originando a variação do *phase-shift* ao longo da frente de onda.

Relativamente ao tipo de erros que ocorrem normalmente nas técnicas de medição de fase podem encontrar-se alguns trabalhos mais ou menos detalhados acerca do assunto [9,10,11,12,13].

2+1 Imagens

Esta técnica, por vezes designada como sendo de três imagens, na realidade recorre ao uso de quatro imagens [12]. Foi desenvolvida para ser usada na presença de vibrações ou de perturbações ambientais (turbulência) por Wizinovich [14]. A aquisição rápida das imagens é importante quando os objectos não podem ser colocados na mesma mesa em que se encontra o interferómetro. Com esta técnica o isolamento das vibrações não é tão crítico, pois são gravadas rapidamente duas imagens com um desfasamento relativo de $\pi/2$ e a dita terceira imagem pode ser gravada em qualquer altura. A terceira imagem é obtida através da média de duas imagens com um desfasamento relativo de π , constituindo portanto o termo contínuo do padrão de interferência:

$$I_3 = \frac{1}{2}(I_0 + I_{180}) = I_M \quad (4.21)$$

Com as duas primeiras imagens, a fase pode ser calculada através da expressão:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_{90} - I_M}{I_0 - I_M} \right) \quad (4.22)$$

O uso desta técnica com franjas primárias retirar-lhe-ia todas as vantagens, pois seria necessário adquirir quatro imagens em vez de duas e, por isso, é apenas aplicada a franjas secundárias.

Métodos com 5 Imagens

Um método usando cinco imagens foi introduzido por Hariharan [15] com o fim de minimizar os erros de calibração. O algoritmo foi desenvolvido para tentar evitar que o numerador e o denominador da expressão de cálculo tendam para zero, reduzindo assim os erros nos cálculos. A expressão de cálculo da fase com degraus de fase α é dada por:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1 - \cos 2\alpha}{\sin \alpha} \cdot \frac{I_{-\alpha} - I_{\alpha}}{2I_0 - I_{-2\alpha} - I_{2\alpha}} \right) \quad (4.23)$$

O uso de $\alpha = \pi/2$ permite simplificar a expressão para:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{2(I_{-90} - I_{90})}{2I_0 - I_{-180} - I_{180}} \right) \quad (4.24)$$

que é uma expressão de cálculo muito simples, por exemplo para programação de processadores dedicados.

Métodos com Incrementos de Fase $2\pi/N$

Esta é mais uma técnica de cálculo de fase baseada no método dos mínimos quadrados e na teoria de comunicações [16]. Para a detecção síncrona de um sinal com ruído, correlaciona-se esse mesmo sinal com sinais seno e co-seno com a mesma frequência e faz-se a média ao longo de vários períodos de oscilação. Com incrementos de fase $\alpha_i = 2\pi i/N$, com $i=1, \dots, N$, isto é com N medições igualmente espaçadas ao longo de um período, o cálculo de fase conduz a [16,17]:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sum I_i \sin \alpha_i}{\sum I_i \cos \alpha_i} \right). \quad (4.25)$$

Uma nova classe de algoritmos foi recentemente introduzida por Larkin e Oreb [18,19], que reduz a sensibilidade à calibração do *phase-shift* e às não linearidades do detector. Um trabalho bastante completo sobre a análise da maior parte dos algoritmos temporais de cálculo de fase pode ser encontrado em Chousal [2].

4.3.3 - Métodos de introdução da modulação de fase

As técnicas temporais de modulação de fase, ou *phase shifting*, necessitam que um dos feixes que compõe o interferómetro possa ser modulado em relação ao outro feixe. Esta modulação, introduzida sobre a fase da onda luminosa, é conseguida através da geração de atrasos na sua propagação. Vários métodos existem para alcançar este objectivo (dispositivos piezoeléctricos, fibras ópticas, placas de atraso de onda ou sistemas electro-ópticos).

Estes dois últimos métodos são respectivamente o mais simples e o mais complexo. O primeiro, não permite o controlo da modulação introduzida, apenas funciona com valores fixos de variação de fase e de uma forma estática. O segundo utiliza um sistema eléctrico de alta-tensão aplicada a um meio cristalino para gerar os atrasos. Assim, os sistemas electro-ópticos não são ainda compatíveis com as necessidades de portabilidade e simplicidade exigidas aos sistemas industriais.

Actualmente os dois tipos de sistemas de modulação de fase mais correntes nos sistemas de interferometria de *speckle* são os baseados na:

- Modulação por fibra óptica
- Modulação por transdutor piezo-eléctrico.

São estes dois tipos de modulação, representados na figura 4.8, que foram utilizados ao longo deste trabalho e que em seguida são descritos.

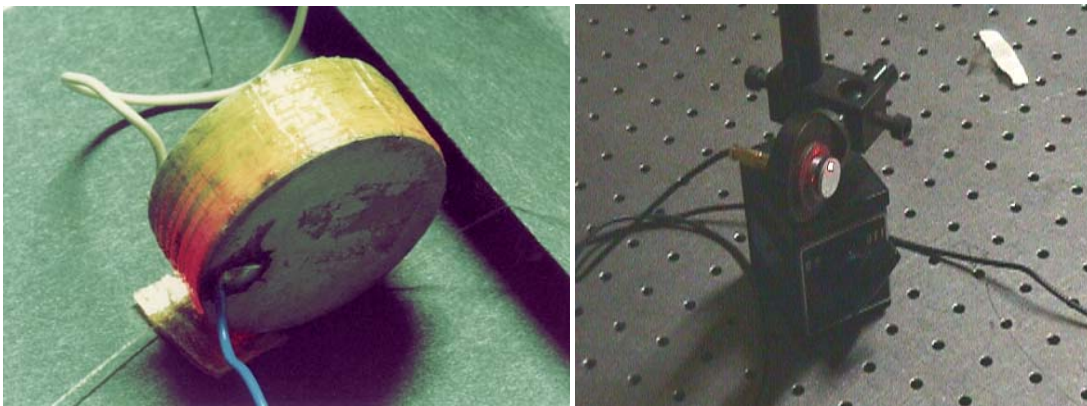


Figura 4.8 – Sistemas moduladores de fase. Por variação da tensão numa fibra óptica e por deslocamento de um espelho.

Na modulação por fibra óptica, esta é tensionada em torno de um cilindro piezo-eléctrico. A aplicação de uma tensão eléctrica entre as duas bases do cilindro provoca a dilatação deste. A fibra enrolada em torno da face lateral vai então ser sujeita a uma elongação que induz uma alteração do caminho óptico do feixe que nela se propaga e por conseguinte da sua fase. Esta variação de fase introduzida pode ser totalmente controlada e calibrada, para que se consigam as variações de fase compatíveis com os algoritmos de cálculo

de fase implementados no sistema de processamento de imagem. Na figura 4.9 apresenta-se um esquema de um sistema de Holografia-TV, realizado pelo autor durante este trabalho, onde o comprimento do braço de referência é modulado através da elongação de uma fibra óptica enrolada em torno de um cilindro piezo-eléctrico [20]. Como foi referido anteriormente o encaminhamento de feixes de interferência por meio de fibras ópticas implica o uso de fibras monomodo. Estas devem ter a possibilidade de preservar a polarização se forem utilizadas em medições quasi-estáticas.

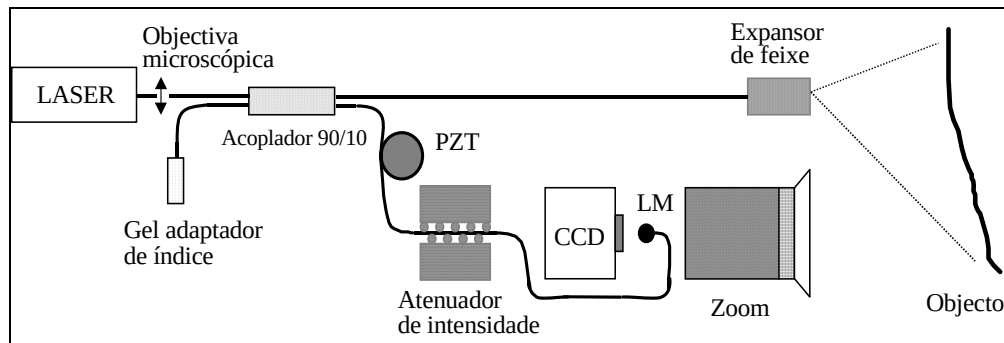


Figura 4.9: Sistema de Holografia-TV com interferómetro realizado por fibras ópticas.

Como a maior parte dos sistemas comerciais de acoplamento óptico apenas permitem razões de acoplamento de 50:50 ou 90:10, frequentemente os 10% de intensidade do feixe de referência são ainda muito elevados. De forma a optimisar a razão dos feixes *objecto/referência* foi utilizado um dispositivo de microcurvatura para aumentar as perdas na fibra e assim reduzir a luz guiada [21]. A situação óptima do sistema pode ser detectada pelo contraste do padrão de franjas (normalmente uma razão 3:1 dá bons resultados).

A modulação por espelho acoplado a um transdutor piezo-eléctrico é a outra forma frequentemente utilizada para modular o feixe de referência. Nestes sistemas, coloca-se solidário com um espelho de reflexão total um transdutor piezo-eléctrico perfeitamente alinhado com o seu eixo óptico. A aplicação de uma tensão eléctrica ao transdutor faz deslocar o espelho e alterar o caminho óptico do feixe que nele se reflecte. Varia-se assim a fase óptica do feixe de referência. Este sistema, tal como o precedente permite a construção de sistemas compactos e portáteis de Interferometria de *Speckle*.

Estes métodos permitem uma fácil calibração das variações de fase introduzidas e são por isso compatível com os algoritmos de cálculo de fase referidos anteriormente. Em seguida descreve-se a forma utilizada para calibrar este tipo de dispositivo e que foi implementada nos sistemas de Interferometria de *Speckle* desenvolvidos no LOME.

Calibração do Sistema de Phase-Shift

Para minimizar o erro no cálculo de fase é necessário garantir uma correcta calibração do sistema modulador. Este pode ser calibrado por determinação de um degrau de fase, α , introduzido dinamicamente num padrão de franjas.

O método desenvolvido para este efeito é baseado na observação de uma sequência de imagens desfasadas de um valor de fase progressivamente alterado pelo operador. O sistema de calibração deve funcionar no modo de franjas secundárias sendo o sistema de *phase-shift* operado em oscilação entre a imagem de fase zero e uma outra com um valor α .

À medida que se aumenta o valor do *phase-shift*, uma oscilação do padrão de franjas é observado no monitor do sistema de processamento de imagem. Quando se atinge um valor de α correspondente ao salto de uma franja não é detectada qualquer alteração no padrão e o modulador está ajustado. Desta forma é conseguido, um controlo preciso do valor do *phase-shift*.

Uma vez calibrado o sistema modulador de fase só será necessário um novo ajuste no caso de avaria ou quando for substituída a fonte de iluminação por uma de diferente comprimento de onda.

4.3.4 – TÉCNICAS DE MODULAÇÃO ESPACIAL

Estas técnicas permitem obter informação de fase a partir de um único interferograma ou um par de registos holográficos, obtidos antes e após deformação, e são baseadas no algoritmo *Fast Fourier Transform* (FFT). Dois tipos de algoritmos de Fourier podem ser utilizados. Um processa a informação exactamente como é recolhida no interferograma e o outro recorre à introdução de uma frequência portadora espacial. O primeiro, embora pareça mais simples peca pela dificuldade da extracção de fase, pois problemas de inversão de sinal surgem devido à impossibilidade do correcto isolamento do sinal pretendido e extracção do termo contínuo [22]. O segundo caso, embora mais complexo em termos de montagem óptica, pois necessita de mecanismos de introdução da frequência espacial, revela-se mais adaptado às técnicas de cálculo de fase. Este foi o método utilizado nesta tese para extrair os mapas de fase por FFT.

Neste caso, o sinal de fase pretendido é utilizado para modular uma portadora espacial introduzida propositadamente no registo holográfico. Para este efeito duas soluções são normalmente adoptadas, consistindo uma na introdução da portadora nas franjas primárias e a outra na geração de uma portadora nas franjas secundárias. No primeiro caso a realização da referência é efectuada de forma a gerar um padrão de franjas cuja frequência possa ser registada pelo detector. O ajuste do sistema deverá ser realizado para que a portadora espacial introduzida seja compatível com a resolução do detector. A distribuição de fase final é obtida por subtracção das fases respectivas de ambos os registos.

O segundo método, cálculo de fase a partir das franjas secundárias, utiliza directamente os interferogramas, obtendo a sua fase por cálculo em tudo semelhante ao anterior. O ajuste do sistema é bastante mais delicado pois, não só a resolução do CCD deverá ser tida em conta, como também a portadora deverá ser devidamente ajustada ao sinal a medir. Uma portadora com frequência insuficiente colocará, no domínio das frequências, a modulação em torno do termo contínuo inviabilizando o seu correcto isolamento. Quer isto dizer que se o deslocamento do objecto for superior ao esperado se obtém um conjunto de franjas fechadas que colocam a

modulação introduzida na portadora em torno da origem. Isto implica um ajustamento conveniente da portadora em cada medição.

Em ambos os métodos, a aplicação do cálculo da FFT aos interferogramas digitalizados, gera três zonas distintas no domínio das frequências espaciais. Uma localizada próxima da origem das frequências, relacionada com a intensidade do fundo, e normalmente desprezada. As outras, duas zonas espectrais centradas na portadora contêm informação acerca da modulação de fase introduzida pelo objecto. Esta informação encontra-se num par de lóbulos posicionados simetricamente em relação à origem que contêm a mesma informação a menos do sinal. A desmodulação da portadora é obtida isolando um dos lóbulos, eliminando toda a informação restante, e transladando-o para a origem. A fase pode ser calculada a partir da função arco-tangente da parte imaginária sobre a parte real que resultam da FFT inversa. Os mapas de fase resultantes são obtidos pelo cálculo de uma função $\arctg$, tal como no caso da modulação temporal, sendo assim apresentam descontinuidades devidas às singularidades da função. A aplicação de algoritmos de *unwrapping*, ou de desmodulação, permite eliminar essas descontinuidades.

Estas técnicas envolvem maior volume de cálculo que as técnicas de modulação temporal, no entanto, estão melhor adaptadas que estas à caracterização de fenómenos rápidos. Dado que apenas dois registos são necessários estas técnicas são também mais indicadas para utilização em ambientes de grande instabilidade.

Extracção da fase através da introdução de uma frequência portadora

O método da frequência portadora baseia-se na introdução de uma rotação da frente de onda por meio da rotação de um dos feixes do interferómetro. A medição fica codificada num padrão de franjas propositadamente introduzido para o efeito. Esta codificação permite isolar espacialmente no espaço das frequências o termo referente à modulação do termo contínuo. Desta forma é possível desmodular, apenas recorrendo à FFT inversa, o termo que contém a informação desejada.

A título de exemplo e sem perda de generalidade pode considerar-se que as franjas portadoras são paralelas ao eixo dos yy 's e que têm uma frequência espacial f_0 . Neste caso, considerando que o sinal a medir tem uma banda de frequências muito inferior à banda do *speckle*, o termo de fase aleatória é desprezado. Assim, a distribuição de intensidade registada é dada por:

$$I_{(x,y)} = I_{o(x,y)} (1 - M_{(x,y)} \cos(\Delta\phi_{(x,y)} + 2\pi f_0 r)) \quad (4.26)$$

Esta expressão pode ser escrita da seguinte forma:

$$g_{(x,y)} = a_{(x,y)} + b_{(x,y)} \cos(\Delta\phi_{(x,y)} + 2\pi f_0 r) \quad (4.27)$$

onde $a_{(x,y)}$ e $b_{(x,y)}$ são variações indesejáveis de intensidade que representam os termos de intensidade do fundo e modulação, $\Delta\phi_{(x,y)}$ é a fase que queremos extrair e f_0 é a frequência portadora da informação introduzida através da criação de franjas paralelas. Neste caso os índices (x, y) são propositadamente introduzidos para uma maior clareza da exposição.

Após a decomposição do cosseno, a equação 4.27 pode ser escrita da seguinte forma:

$$g_{(x,y)} = a_{(x,y)} + c_{(x,y)} e^{i(2\pi f_0 x)} + c_{(x,y)}^* e^{-i(2\pi f_0 x)} \quad (4.28)$$

com,

$$c_{(x,y)} = \frac{b_{(x,y)}}{2} e^{i \Delta\phi_{(x,y)}} \quad (4.29)$$

Na equação 4.28 $c_{(x,y)}^*$ é o complexo conjugado de $c_{(x,y)}$.

A separação do valor de fase $\Delta\phi$ da fase de referência $2\pi f_0 x$ necessita do uso do algoritmo de *Fast Fourier Transform*, para obter a transformada de Fourier da imagem. A determinação dos valores de fase exige que o termo $c_{(x,y)}$, contendo esta informação, seja isolado no domínio das frequências. A equação 4.29 após realizar uma transformação de Fourier a uma dimensão passa para o domínio das frequências com a forma:

$$G(f,y) = A(f,y) + C(f-f_0,y) + C^*(f+f_0,y) \quad (4.30)$$

Se as variações espaciais de $a_{(x,y)}$, $b_{(x,y)}$ e $\Delta\phi_{(x,y)}$ forem pequenas quando comparadas com a frequência portadora espacial f_0 – uma condição a ser preenchida experimentalmente – os espectros A, C e C^* estarão bem separados pela frequência portadora f_0 , como se representa na figura 4.10. Os espectros C e C^* estão colocados simetricamente no domínio das frequências em relação ao termo contínuo (intensidade do fundo) e estão centrados em $f=\pm f_0$.

A utilização de uma portadora espacial tem, em relação à técnica simples de cálculo da FFT, a vantagem de permitir isolar facilmente o termo de interesse. Na figura 4.10 pode observar-se o espectro de frequências na situação em que não existe separação entre o sinal e o termo contínuo, ausência de portadora, e o espectro numa situação em que a frequência da portadora é suficiente para garantir a total separação do sinal.

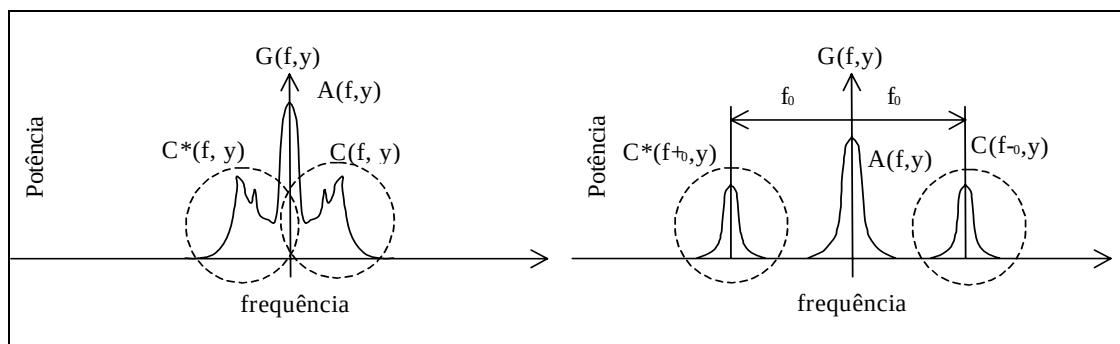


Figura 4.10 – Representação esquemática do espectro de frequências de um sinal:

a) sem portadora espacial e b) com portadora espacial.

A obtenção da fase da imagem inicial, a partir da figura 4.10b) é realizada isolando o lóbulo com interesse, direito ou esquerdo conforme a portadora, através de uma janela de filtragem, que geralmente é um filtro de

Hanning centrado em f_0 . Esta janela de filtragem é escolhida por ser aquela que gera menos erros nas regiões de fronteira. De referir que a escolha da janela de filtragem pode ter efeitos dramáticos na qualidade dos resultados obtidos [23]. Posteriormente translada-se o termo isolado para a origem das frequências e obtém-se $C(f, y)$. Esta operação é equivalente a retirar a frequência portadora original do sinal de modulação.

O valor $c(x, y)$ é obtido em seguida por aplicação da transformada de Fourier inversa ao sinal obtido anteriormente por translação para a origem e pode ser calculado a partir de:

$$c_{(x,y)} = \frac{b_{(x,y)}}{2} e^{i \Delta\phi_{(x,y)}} = \frac{b_{(x,y)}}{2} [\cos(\Delta\phi_{(x,y)}) + i \sin(\Delta\phi_{(x,y)})] \quad (4.31)$$

A informação de fase de módulo 2π pode ser extraída através da equação anterior, utilizando para isso a função arco-tangente:

$$\Delta\phi_{(x,y)} = \arctg \frac{\Im(c_{(x,y)})}{\Re(c_{(x,y)})} \quad (4.32)$$

A figura 4.11 apresenta um diagrama de obtenção da fase para os dois tipos de algoritmos possíveis: a introdução da frequência portadora no padrão de *speckle* secundário e no primário. A introdução de uma frequência portadora nas franjas primárias, apesar de mais complexa, revela-se mais apropriada ao estudo de fenómenos rápidos e sobre os quais não se tem a certeza sobre os limites de deformação a medir.

Na primeira técnica cada padrão de *speckle* não possui informação suficiente para o cálculo de fase. Desta forma, só após realizar a correlação entre os dois padrões se obtêm as franjas secundárias a partir das quais é possível calcular a fase. No segundo caso ambos os padrões de *speckle* possuem informação suficiente para permitir o cálculo de fase. A portadora encontra-se registada nos grãos de *speckle* pelo que permite determinar a fase de cada um deles. Neste segundo caso é necessário realizar o cálculo de duas FFT, uma por padrão.

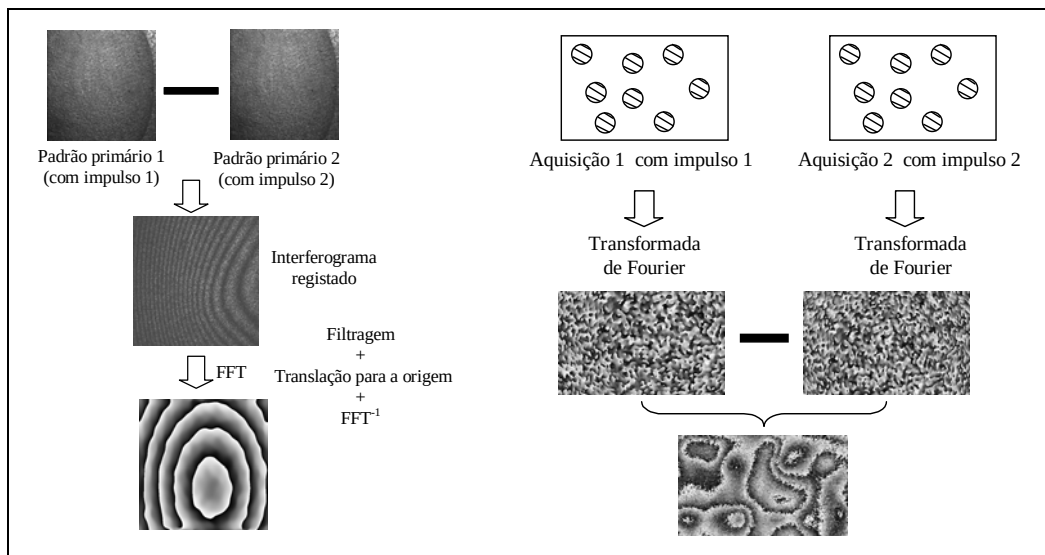


Figura 4.11 – Obtenção da fase através da desmodulação da portadora espacial nas franjas secundárias e primárias.

Embora no primeiro caso apenas seja necessário registar um interferograma no segundo só gravando os dois padrões se poderá obter o cálculo de fase. Este será, por ventura, o ponto negativo desta abordagem.

Se considerarmos que cada grão de *speckle* ocupa 5 *pixeis* e que dentro de cada grão existem 3 franjas portadoras, para um CCD com 512 *pixeis* existe uma frequência portadora de cerca de 300. Esta frequência permite isolar perfeitamente os dois lóbulos do espectro de frequências. Este ajuste é feito no início da medida e manter-se-á durante todas as medições, pois a deformação do objecto não interfere com a portadora. Contudo, o facto de necessitar de grãos de *speckle* de grandes dimensões para que a frequência portadora se possa inscrever no seu interior, implica que a abertura óptica do sistema deve ser reduzida, o que implica uma menor eficiência do sistema.

Ao contrário do algoritmo anterior, a introdução da frequência portadora não introduz um termo de fase adicional devido ao não paralelismo entre franjas. A filtragem com uma janela de Hanning também aqui não é necessária pois a separação dos lóbulos é tal que um filtro rectangular não introduz variações substanciais ao isolamento do sinal de fase a determinar. Este foi o algoritmo utilizado na maior parte das medições de fenómenos rápidos (análise modal, choques) que são apresentados no capítulo 6.

Erros de cálculo nas fronteiras da imagem e do objecto observado

Na maior parte dos casos, o objecto observado não ocupa a totalidade do ecrã donde o risco de diferenças importantes de intensidade na imagem. Estas diferenças introduzem altas-frequências deformando a informação de fase nos bordos do objecto. Uma solução consiste em completar as zonas não utilizadas com o nível de cinzento médio do sinal útil, de forma a minimizar o salto de intensidades. No entanto, se a intensidade variar ao longo do objecto, a introdução de um valor constante não é suficiente. É necessário determinar uma superfície que passe pelos pontos fronteira do objecto e então determinar a intensidade média [24].

A dificuldade na introdução de uma portadora de elevada frequência perfeitamente paralela ao longo de toda a imagem provoca a adição de um termo complementar à fase desejada. Uma operação de eliminação deste sinal deve ser realizada subtraindo a fase da portadora isolada com a fase do interferograma transladado em frequência. Outro método de eliminação das irregularidades da portadora pode ser utilizado. Neste caso é gravado um interferograma do objecto sem qualquer deformação, apenas com a portadora, e calculada a respectiva fase. Esta informação será posteriormente subtraída à fase de todos os interferogramas eliminando assim a influência das variações da portadora. Este método é ilustrado na figura 4.12. Desta forma são minimizados os erros de leitura devidos a irregularidades na portadora.

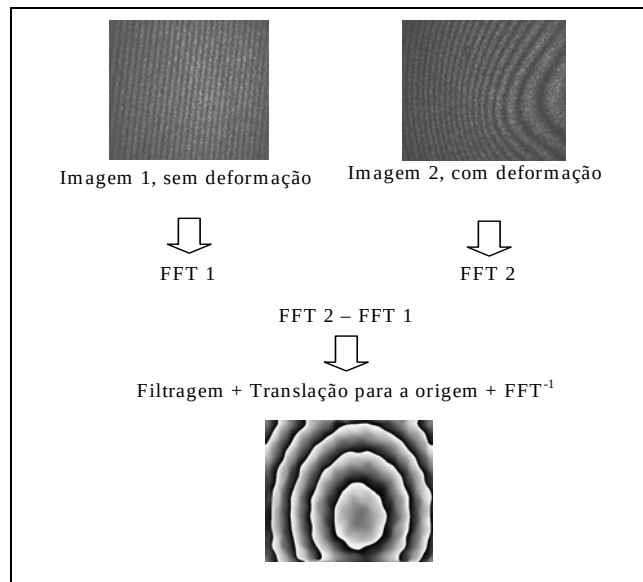


Figura 4.12 – Remoção dos erros de fase devidos a variações da portadora.

Vantagens e limitações das técnicas de modulação espacial

Do que atrás foi dito pode concluir-se que a aplicação das técnicas de modulação espacial no cálculo da fase exige a introdução de uma portadora espacial conhecida, para que os problemas de inversão de sinal sejam eliminados. Dado que da frequência dessa portadora depende a possibilidade de isolar o termo que contém o sinal é importante ter controlo sobre o ajuste dessa frequência. Este ajuste é realizado de forma diferente consoante a portadora utilizada é introduzida nos padrões de interferência primária ou nos padrões secundários.

No primeiro caso o ângulo entre as duas frentes de onda do interferómetro deverá ser ajustado de forma a obter uma portadora que seja resolvida pelo detector e separe completamente os dois lóbulos que contêm a modulação. Uma vez ajustado o interferómetro poderá ser utilizado independentemente da deformação sofrida pelo objecto pois os cálculos de fase por FFT são realizados de forma independente sobre cada um dos registos interferométricos. No entanto, dado que existe uma variação de fase contida em cada grão de *speckle* e que cada grão deverá cobrir pelo menos três *pixels* do CCD é necessário utilizar aberturas do sistema óptico muito pequenas. Tal limitação resulta do facto de entre dois grãos de *speckle* distintos não existir continuidade na variação espacial da fase. A obtenção do gradiente de fase é normalmente conseguida introduzindo um determinado ângulo entre as frentes de onda do interferómetro que se sobrepõem no CCD.

Uma variante deste método é vulgarmente conhecida por técnica dos três *pixels*. Neste caso o ângulo entre ambas as frentes de onda é rigorosamente ajustado de forma a introduzir um gradiente de fase entre três ou mais *pixels* sobre toda a imagem. O *speckle* deverá também ter uma dimensão compatível, isto é, ocupar três ou mais células de imagem. Os algoritmos utilizados para o cálculo de fase são semelhantes aos utilizados nas técnicas de modulação temporal não recorrendo ao cálculo de FFTs.

No segundo caso o algoritmo de cálculo de fase é obtido sobre um interferograma, sendo assim, no caso de se utilizarem *lasers* com dupla cavidade será necessário que o par de impulsos gerados seja coerente.

Variando ligeiramente a direcção de iluminação entre os dois registos holográficos é possível criar um interferograma que contém um padrão de franjas paralelo. Descreve-se em seguida o método de obtenção de mapas de fase através da desmodulação espectral de um padrão secundário indicando as suas principais limitações. Como se pode observar na figura 4.13, é possível obter directamente dos interferogramas mapas de fase com boa qualidade. Nesta figura, além da modulação da portadora introduzida pela deformação pode ainda observar-se o espectro da transformada de Fourier e o mapa de fase obtido.



Figura 4.13 – Determinação de um mapa de fase a partir da introdução de uma portadora num padrão de franjas secundárias. Padrão de franjas, espectro de Fourier e mapa de fase.

Aumentando o deslocamento imposto ao objecto, aumenta a modulação. Se a portadora tiver uma frequência baixa para a deformação a medir aparecerá um conjunto de franjas fechadas. Neste caso o algoritmo conduz a uma zona de erros no mapa de fase. Na figura 4.14 representa-se o padrão de franjas obtido para um deslocamento maior que o anterior.

Como se pode observar, no espectro das frequências existe uma sobreposição entre os lóbulos que impede o seu isolamento. No mapa de fase surgem erros na zona correspondente à área em que a modulação inclui o termo de ordem zero. Este problema seria resolvido aumentando a frequência da portadora, isto implica o conhecimento antecipado da amplitude do deslocamento a medir.



Figura 4.14 – Padrão secundário com portadora de frequência insuficiente. Padrão de franjas, espectro de Fourier e mapa de fase com erros.

Existe ainda outra limitação importante quando estes métodos são utilizados sobre imagens de *speckle*. A utilização de portadoras de frequência elevada permite a medição de deslocamentos de maior amplitude. Contudo, tais deslocamentos implicam que uma maior área do espectro contenha a informação da modulação. Desta forma é admitido no cálculo um maior volume de ruído devido ao *speckle*, a figura 4.15 é disso representativa. Apesar da frequência da portadora ser suficiente para separar completamente os dois termos que contêm a modulação, o peso relativo do ruído introduzido no cálculo aumentou também.

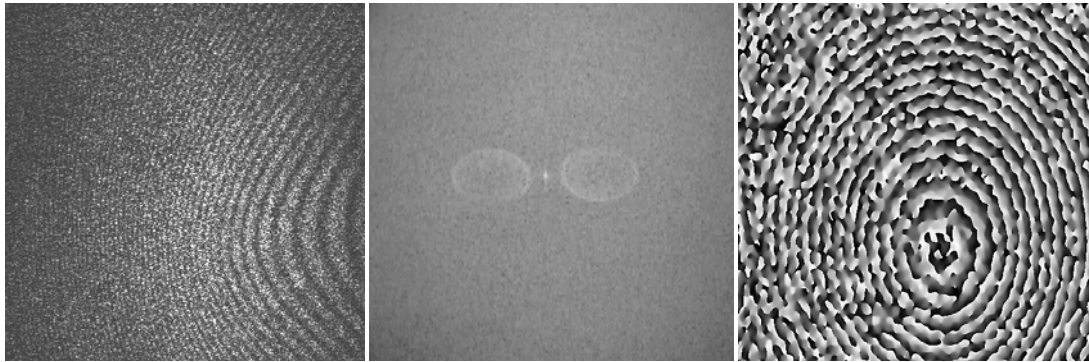


Figura 4.15 – Erros no cálculo da fase devido à introdução de uma grande quantidade de ruído de *speckle*.

Padrão de franjas, espectro de Fourier e mapa de fase com erros.

O mapa de fase representado na figura 4.15 embora aparentemente contenha a maior parte da informação que caracteriza a deformada do objecto, possui erros de inversão de fase que seriam difíceis de ultrapassar recorrendo a algoritmos de desmodulação (*unwrapping*) convencionais.

Como principal vantagem este método apresenta uma maior facilidade de ajuste e uma configuração óptica mais eficiente, o tamanho do *speckle* deverá ser ajustado apenas de acordo com a dimensão do *pixel*.

Sinusoidal Fitting

A transformada directa e inversa de Fourier requeridas pela desmodulação espectral dos interferogramas ou padrões de *speckle* primários dos métodos anteriormente apresentados tornam estes algoritmos computacionalmente pesados. A aplicação da desmodulação sinusoidal proposta por Mertz [25] permite obter resultados de qualidade semelhante e de forma mais eficiente [2]. Este método consiste na multiplicação do sinal por funções sinusoidais com uma frequência espacial próxima da portadora de sinal. Desta forma são obtidos batimentos com variações lentas de amplitude proporcionais ao seno e co-seno da fase do objecto [26].

A dedução matemática da desmodulação sinusoidal pode ser feita de uma maneira semelhante à da desmodulação espectral, *i.e.*, transformando a equação da intensidade do padrão de franjas. Assim, considerando um só harmónico a que correspondem os dois primeiros termos do desenvolvimento em série, teremos:

$$I = I_0 + I_M \cos(\Delta\phi + 2\pi f_0 r) = I_0 + C_1 \cos(2\pi f_0 r) - C_2 \sin(2\pi f_0 r) \quad (4.33)$$

onde:

$$\begin{aligned} C_1 &= I_M \cos \phi \\ C_2 &= I_M \sin \phi \end{aligned} \quad (4.34)$$

Daqui se pode obter a fase recorrendo à habitual expressão:

$$\Delta\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{C_2}{C_1} \right] \quad (4.35)$$

Nestas equações I_M é obtido a partir de $I_0 \times M$.

As três incógnitas, I_M , C_1 e C_2 , variam muito lentamente numa vizinhança próxima do *pixel* em cálculo, podendo ser consideradas nessa vizinhança aproximadamente constantes. Estas três constantes podem então ser determinadas por ajuste da equação 4.33 à intensidade de três *pixel* consecutivos, cuja solução será dada por:

$$\Delta\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{F_{ij} \Delta_{i,j} + D_{ij} \Delta_{i,j-1}}{G_{ij} \Delta_{i,j} + E_{ij} \Delta_{i,j-1}} \right] \quad (4.35)$$

onde

$$\begin{aligned} G &= \sin(2\pi f_0 r_{i,j-1}) - \sin(2\pi f_0 r_{i,j}) \\ E &= \sin(2\pi f_0 r_{i,j+1}) - \sin(2\pi f_0 r_{i,j}) \\ F &= \cos(2\pi f_0 r_{i,j-1}) - \cos(2\pi f_0 r_{i,j}) \\ D &= \cos(2\pi f_0 r_{i,j+1}) - \cos(2\pi f_0 r_{i,j}) \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\Delta_{i,j} = I(r_{i,j+1}) - I(r_{i,j})$$

$$\Delta_{i,j-1} = I(r_{i,j}) - I(r_{i,j-1})$$

Como a desmodulação sinusoidal não recorre ao uso da FFT, os tempos de cálculo são inferiores [27]. Uma abordagem mais simples e, curiosamente, com melhores resultados foi sugerida por Macy [28] e, mais tarde, seguida por Williams *et al.* [29]. Esta técnica é também frequentemente designada por *phase stepping* espacial. O processo de desmodulação é baseada no mesmo pressuposto referido anteriormente de que a fase correspondente à informação que queremos obter varia muito mais lentamente que a fase da portadora de sinal. Uma descrição mais detalhada de todos estes métodos pode ser encontrada em Chousal [2].

4.4 - SISTEMAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

O tratamento digital de imagens pode ser realizado por *software* ou, mais rapidamente, através de *hardware* dedicado. A implementação de um sistema de tratamento de imagens por *software* necessita a utilização de um computador onde um sistema de aquisição de imagem esteja instalado. Este sistema regista as imagens, processa-as e envia-as para uma sistema de visualização, permitindo ainda o seu armazenamento. Cada imagem registada pela câmara é convertida num sinal vídeo que é enviado para a memória de imagem instalada no computador. Esta, por sua vez, gera um sinal que poderá ser enviado para um monitor externo ou directamente para a placa gráfica do computador. O sinal vídeo é utilizado na placa de imagem para gerar uma matriz, normalmente de valores inteiros positivos, correspondente à distribuição espacial do brilho da imagem. Todos os cálculos são realizados sobre estas matrizes, sendo a matriz final utilizada para gerar o sinal vídeo que permite a visualização da imagem processada.

A conversão dos sinais eléctricos provenientes do CCD em valores de brilho é normalmente realizada por *hardware* através de LUT's e conversores A/D e D/A. As LUT's, permitindo efectuar conversões em tempo real, são programáveis e frequentemente utilizadas no processamento.

Presentemente cresce o número de componentes, incluídos na placa de imagem, especialmente vocacionados para o processamento de imagens por *hardware*. As FFT, muitas vezes evitadas devido ao esforço de cálculo exigido, são hoje processadas em tempo real por muitas placas. Estas permitem também utilizar câmaras digitais e substituem as placas gráficas normalmente instaladas.

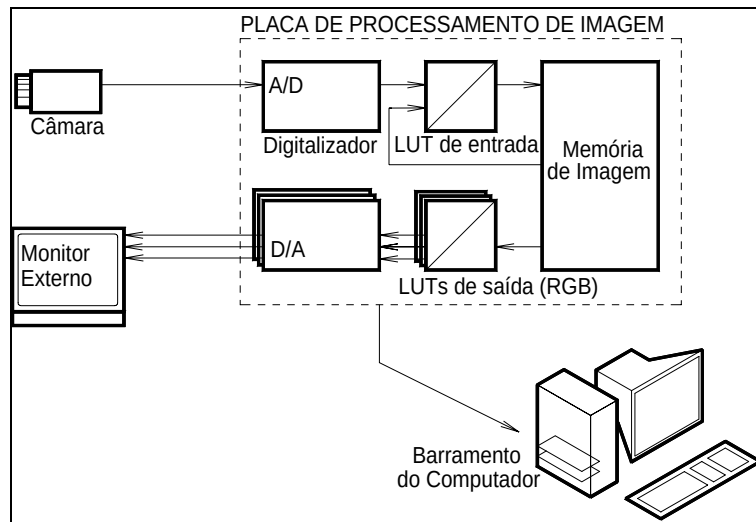


Figura 4.16 – Representação esquemática de um sistema de processamento de imagem[2].

Os componentes básicos de uma plataforma de processamento de imagem são:

- Sistema de aquisição de imagem;
- Sistema de conversão de imagem Analógico/Digital;
- Sistema de processamento através de CPU ou DSP, incluindo rotinas de processamento;
- Sistema de visualização.

A imagem é adquirida através de uma câmara analógica ou digital. No caso do sinal ser analógico este é enviado ao conversor A/D existente na placa de aquisição de imagem que se encontra no barramento do PC. Esta operação, digitalização, é feita por amostragem do sinal analógico em intervalos de tempos discretos, convertendo essa amostra num valor digital. As câmaras CCD digitais integram já este conversor.

A imagem na forma digital é então armazenada na memória RAM (nos chamados *frame-buffers*) existente nas placas de processamento de imagem, ou na memória do próprio computador. As imagens gravadas ficam assim caracterizadas por uma matriz de valores cujas dimensões variam de acordo com a resolução do sistema de imagem. A imagem armazenada em memória pode ser visualizada através de um monitor externo se esta passar por um conversor D/A que transforma o sinal do *pixel* de novo em sinal analógico. Nas placas de aquisição de imagem mais recentes, instaladas de forma a substituir a placa gráfica, o monitor externo pode ser dispensado.

O processamento do sinal armazenado pode ser feito na placa de processamento de imagem ou no próprio computador, dependendo das características daquela e das operações em causa. Entre os dois tipos de conversores A/D e D/A existem as tabelas de níveis de cinzento de entrada e saída (LUT, de look-up table) que permitem fazer a correspondência entre os valores digitalizados pela placa e a amostragem no monitor. Nalgumas placas a tabela de entrada pode ser realimentada. Esta, função permite a realização de subtração em tempo-real se a placa contiver um módulo aritmético (ALU - Arithmetic Logic Unit), ver figura 4.5.

As imagens recebidas pela câmara podem ter resoluções diferentes em termos de células unitárias (pixels) mas a maior parte delas apresenta uma resolução de 8 bits na codificação da intensidade. Assim, é possível

codificar os sinais digitalizados em 256 níveis de cinzento (0 para o preto e 255 para o branco). É esta correspondência entre o valor do sinal armazenado em memória e o valor de cinzento que é ditada pela LUT, se programada linearmente.

A adição de um módulo aritmético (ALU - Arithmetic Logic Unit) permite a realização em tempo-real de operações envolvendo dois sinais. Existe neste caso um conjunto de operações pré-programadas, que podem ser seleccionadas por *software* e com as quais é possível efectuar operações entre duas imagens à frequência vídeo. Se a imagem inicial for armazenada num *buffer* de imagem pode ser comparada com as novas imagens que chegam a esta unidade. Esta unidade, associada a uma LUT realimentada, ou de *feedback*, permite a realização de subtracção em tempo-real essencial para a interferometria por correlação de *speckle*.

Uma primeira imagem é adquirida pela câmara CCD e é digitalizada (internamente ou na placa de aquisição de imagem). Passa de seguida pela LUT de entrada sem ser alterada, o seu declive é 1, e é enviada para a ALU. Esta primeira imagem passa pela ALU sem sofrer alterações e é armazenada num *buffer* de memória. Simultaneamente uma segunda imagem é adquirida pela câmara e atinge a ALU como a precedente. Nesta altura, a imagem previamente gravada realimenta a ALU onde as duas imagens são subtraídas, tomando em conta o *bit* de sinal, ou seja a operação de subtracção permite aumentar o número de resultados possíveis de 256 (8 *bit*) para 512 (9 *bit*). O resultado, que contém invariavelmente valores negativos, é enviado para a LUT de rectificação para se obter uma imagem que apresenta franjas secundárias. A programação das LUT's de saída permite ainda aumentar a visibilidade. São as LUT de saída, programáveis individualmente que condicionam a amostragem das imagens em tons de cinzento (níveis RGB todos iguais) ou em cores falsas (níveis diferentes para o vermelho, verde e azul).

As plataformas de processamento de imagem existentes até meados da década de 90 fazem uso de uma placa de aquisição de imagem e de uma placa de processamento digital paralelo. Este facto torna os sistemas mais complexos e caros. No entanto, até esta data poucas alternativas existiam. A necessidade de utilizar um processamento paralelo surge porque as plataformas que utilizam PC são lentas, devido à arquitectura do barramento ISA e à existência de processadores subaproveitados.

A proliferação do barramento PCI a partir de meados da década de 90, mais rápido, combinado com processadores da classe Pentium e sistemas operativos de 32 bits, permitiu que os sistemas de processamento de imagem internos concorram directamente com os processadores paralelos de sinal. As aplicações de processamento de imagem cujos requisitos são satisfeitos através de processadores Pentium introduzem uma redução de custos significativa quando comparadas com as aplicações que utilizam o processamento paralelo do sinal num barramento ISA. Tal facto deve-se principalmente à eliminação dos processadores DSP (Digital Signal Processing). A utilização de sistemas baseados na configuração Pentium-PCI é mais económica que a baseada em processadores 486-ISA. Nesta tese os dois casos foram explorados:

- Um sistema baseado num processador 486 e numa arquitectura de bus ISA, que utiliza uma placa Data Translation DT2861
- Um sistema baseado num processador Pentium e numa arquitectura PCI, que utiliza uma placa Matrox Pulsar.

O primeiro foi utilizado nas medições de fase por modulação temporal e por FFT nas franjas secundárias e o segundo nas medições de fase por FFT nas franjas primárias. Presentemente tudo aponta para que a segunda solução venha progressivamente a substituir a primeira. Estes sistemas podem ser utilizados com iluminação contínua e pulsada e têm sido alvo de grandes reduções de custo.

4.4.1 - Processamento de imagem (MICAM+DT2861+486) aplicações dinâmicas

Este sistema consiste num computador equipado com um processador Intel 486, no barramento do qual se encontrava instalado uma placa de imagem DT2861 da Data Translation. Uma câmara CCD convencional foi utilizada na gravação das imagens e um processador DSP da Data Translation foi programado para realizar as operações de cálculo mais pesado de que as FFT são exemplo.

Este sistema foi desenvolvido para registar numa câmara CCD MICAM convencional dois padrões de *speckle* obtidos a partir da iluminação por duplo impulso.

Um circuito electrónico foi desenvolvido para, à frequência vídeo convencional, permitir gravar cada um dos impulsos do laser nos dois quadros (par e ímpar) que constituem uma imagem. Um sinal de *trigger* desencadeava uma série de eventos que faziam com que a placa de imagem DT2861 registasse nos seus buffers de imagem dois registos de *speckle* correspondendo a imagens com os dois quadros diferentes, um correspondendo ao primeiro impulso e outro, com a iluminação do segundo.

Todo o *software* utilizado foi desenvolvido no LOME em linguagem C a partir de um conjunto de rotinas disponíveis no programa DT-IRIS do fabricante da placa de imagem [4].

Como principais vantagens da utilização deste sistema pode citar-se a possibilidade de utilizar câmaras CCD analógicas para registar padrões de *speckle* em duplo impulso e o baixo preço de todo o sistema. Neste caso a menor velocidade de cálculo do processador 486 era compensada pela existência do DSP.

Entre as principais desvantagens conta-se a baixa resolução do sistema e as severas restrições impostas pela temporização vídeo convencional às temporizações de funcionamento do laser, principalmente no que se refere ao intervalo de tempo entre impulsos. Foi esta última desvantagem que provocou o abandono desta solução.

4.4.2 - PROCESSAMENTO DE IMAGEM (SONY+PULSAR+PENTIUM32 BITS)

A partir do momento em que ficou disponível no mercado uma câmara analógica com possibilidade de ser operada de forma assíncrona foi decidido implementar um novo sistema com este tipo de detector. O sistema desenvolvido neste trabalho utilizava uma câmara SONY XC8500 CE (+adaptador de memória CMA87) e uma placa de aquisição de imagem Matrox Pulsar (+ RS422). Neste caso foi utilizado um computador Pentium II 266 MMX 64 MB RAM para servir de suporte a todo o *hardware*.

O *software* utilizado foi desenvolvido no LOME a partir das livrarias MIL5.1+Matrox Intellicam v2.01.

Esta câmara analógica permite a utilização contínua a 25 Hz e registo assíncrono com um intervalo mínimo entre um par de imagens de 3 μ s. Dado que esta temporização não permite transferir ambas as imagens para os *buffers* da placa esta câmara está equipada com uma memória externa onde temporariamente é armazenada uma das imagens.

Este sistema apresenta um enorme progresso em relação ao anterior. Com ele é possível registar pares de padrões de *speckle*, de forma assíncrona, e limitada apenas pelas restrições impostas pelo funcionamento do laser. São obtidas as imagens com a total resolução da câmara e existe um controlo electrónico dos tempos de exposição de cada imagem. No que diz respeito à velocidade de processamento a placa Matrox e o processador Pentium contribuíram para a aumentar substancialmente. Como principais desvantagens podem citar-se o preço final do sistema e a adaptação realizada na electrónica da câmara de forma a integrá-la no sistema.

4.4.3 - PROCESSAMENTO DE IMAGEM (KODAK+ PULSAR+PENTIUM 32 BITS) [30]

O terceiro sistema utilizado era constituído por uma câmara CCD digital, integrada no mesmo sistema de aquisição de imagem, placa Matrox Pulsar e processador Pentium.

A câmara CCD digital é uma KODAK MEGAPLUS ES 1.0, de alta resolução com capacidade para gravar imagens de 1008h x 1018v *pixels*.

Neste sistema todas as operações são digitais pelo que são utilizados cabos de ligação com maior capacidade de tráfego. Estas ligações permitem, de uma forma mais simples, controlar todas as operações da câmara, sendo a comunicação entre a câmara e o computador realizada através de uma porta COM. Um programa designado por *Remote Panel* e fornecido com a câmara permite, de uma forma, simples controlar todos os seus parâmetros de funcionamento, tais como:

- Modo de funcionamento;
- Fonte de *trigger*;
- Largura de impulsos;
- Tempos de exposição;
- Ajuste entre canais;
- Etc.

Outra característica importante deste sistema é a capacidade de seleccionar facilmente cada um dos quatro modos de funcionamento possíveis: *Triggered*, *Continuos*, *Controlled* e *Triggered Double Exposure*.

Este último foi o modo de funcionamento utilizado neste trabalho. Neste modo duas imagens são adquiridas rapidamente pela câmara. A dupla exposição começa com o sinal de *trigger* externo. É registado um par de imagens completas com um tempo de separação mínimo de 5 μ s.

Deve referir-se que na montagem deste sistema foi necessário resolver vários conflitos surgidos na transferência de informação entre a câmara KODAK e a placa de imagem Matrox Pulsar. Durante a fase inicial da implementação do sistema foram desenvolvidos alguns *drivers* através de contactos mantidos com o grupo de software da Matrox e da empresa HOLO3.

As principais vantagens deste sistema consistem na sua maior resolução e no controlo total por *software* da operação da câmara. Como principal desvantagem deve referir-se o elevado custo dos principais componentes.

Por último deve referir-se que muitos problemas surgidos durante a montagem do sistema se deviam a uma certa imaturidade da tecnologia digital nesta aplicação. Em sistemas mais recentes é possível verificar um melhor desempenho e uma maior compatibilidade entre os componentes.

4.4.4 - PLACA MATROX E ROTINAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

Quando no início da década de 90 o LOME decidiu dedicar-se ao processamento de imagem adquiriu um conjunto de placas de processamento para instalar em barramentos ISA. Estas eram as únicas disponíveis para instalar directamente nos barramentos dos computadores pessoais. Esta tecnologia foi progressivamente abandonada e substituída pelas placas de processamento com ligações PCI. No final da década de 90 foi decidido enveredar por esta tecnologia tendo sido adquirida a placa Matrox Pulsar utilizada neste trabalho.

Esta placa ocupa apenas uma ligação PCI e integra a placa gráfica que substitui a placa vídeo normalmente instalada nos computadores. Trata-se de uma placa de 10 *bits/pixel* com capacidade de aquisição por quadro ou linha, *progressive scan* ou interlaçada.

O circuito de *trigger* permite que esta placa seja operada em vários modos de funcionamento e com diferentes tipos de câmara. O *software* disponibilizado para controlo da placa inclui:

- Matrox Inspector
- Matrox Intellicam
- Matrox Imaging Library (MIL).

O primeiro é um conjunto de rotinas de fácil utilização com as quais é possível realizar a maior parte das operações de pós-processamento de imagens. O segundo consiste numa plataforma de fácil utilização com a qual se controlam os periféricos para a aquisição de imagens. Deve referir-se que ao longo deste trabalho foi possível operar esta placa com todas as câmaras CCD. O terceiro consiste numa livreria de rotinas fáceis de integrar em *software* próprio ou comercial que permite desenvolver programas adaptados ao processamento exigido pela aplicação à Interferometria de *Speckle*.

A placa Matrox tem capacidade para registar, em modo contínuo, imagens a preto e branco com a dimensão de 1K x 1K x 8 bits a uma frequência de 30 Hz.

Uma particularidade desta placa que merece especial destaque tem a ver com a possibilidade de desenvolver *software* próprio continuando a utilizar a capacidade da placa controlar a aquisição a partir de diferentes

periféricos. Trabalhando em cima da plataforma designada por INTELLICAM podem ser construídos pequenos ficheiros, designados por DCF. Um DCF é um documento que especifica os tempos e formato de vídeo e contém informação sobre os valores de cada parâmetro que devem ser enviados para o *digitizer* do sistema (Matrox Pulsar). Desta forma é possível configurar o conversor vídeo de acordo com as características da câmara a utilizar. Na figura 4.17 representa-se o aspecto da janela do programa que permite fornecer todos os parâmetros vídeo para um detector. Como se pode verificar praticamente todos os parâmetros estão acessíveis podendo ser controlados facilmente.

O desenvolvimento das técnicas de Interferometria de *Speckle* com registo pulsado não tinha sido, até esta data, preocupação dos investigadores do LOME. Por isso este trabalho pioneiro no LOME e a nível nacional obrigou ao desenvolvimento de equipamentos e *software* capazes de cumprir com as especificações necessárias a esta aplicação.

O registo de imagem foi uma das áreas em que se verificou uma maior necessidade de desenvolvimento de forma a cumprir satisfatoriamente os requisitos das técnicas pulsadas. Como se pode inferir do que atrás foi dito a primeira aproximação ao registo em dupla-exposição foi feita recorrendo a adaptações de sistemas convencionais. Rapidamente se verificou que, embora com menores custos, estas soluções eram limitadas e não permitiam uma ampla aplicação das técnicas de Interferometria de *Speckle* aos problemas da Mecânica Experimental.

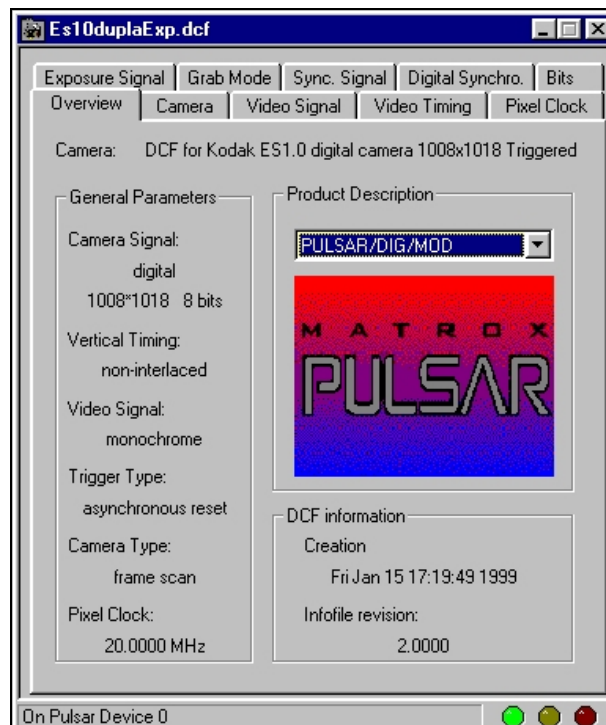


Figura 4.17 – Painel de controlo do programa Intellicam para ajuste dos parâmetros vídeo.

A opção pelo registo de vídeo assíncrono permitiu ultrapassar grande parte das limitações dos sistemas convencionais. O primeiro sistema construído com este tipo de registo revelou-se amplamente satisfatório

tendo permitido obter registros de elevada qualidade como se pode ver no capítulo 6. Embora este sistema tenha cumprido totalmente os requisitos julgados necessários para as aplicações dinâmicas em Mecânica Experimental os sistemas digitais afiguram-se como sendo aqueles que maiores potencialidades de desenvolvimento apresentam. O trabalho de investigação realizado com estes últimos, embora tenha levantado muitos problemas devidos à juventude da tecnologia, revelou-se de enorme interesse para o LOME pois permitiu ganhar experiência com uma tecnologia que será seguramente o futuro no processamento de imagem. Os resultados apresentados no capítulo 6 e obtidos com esta tecnologia são já de boa qualidade embora isso possa não ser evidente se comparados com resultados obtidos com sistemas mais recentes.

Referências

- [1] O. Lockberg & G. Slettemoen, “Basic electronic speckle pattern interferometry”, *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol.10, Academic Press, 1987.
- [2] J. Chouzal, “Técnicas de processamento de imagens obtidas por métodos ópticos em análise experimental de tensões”, *Tese de doutoramento em Engenharia Mecânica*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
- [3] D. Albrecht, “Electronic speckle pattern interferometry: Instruments development, optimisation and applications”, *EU Joint Research Centre*, Special publication n° I.99.40, February 1999, Ispra, Italy.
- [4] J. Chouzal, *Processamento de Imagem na Interpretação de Franjas Interferométricas em Análise Experimental de Tensões*, M.Sc., FEUP, Porto, 1991.
- [5] G. Pedrini, P. Froning, H. Fessler and H. Tiziani; “Transient vibration measurement by using multi-pulse digital holography”, *Optics & Laser Technology*, Vol. 29, Pag. 505-511, 1997.
- [6] K. Creath, “Phase-measurement Interferometric Techniques”, *Progress in Optics*, Vol. XXVI, ed. E. Wolf, Elsevier, Amsterdam, pag. 349-393, 1988.
- [7] F.M. Santoyo, D. Kerr & J. Tyrer, “Interferometric Fringe Analysis Using a Single Phase Step Technique”, *Applied Optics*, Vol. 27, pag. 4362-4364, 1988.
- [8] P. Carré, “Installation et Utilisation du Comparateur Photoelectrique et Interferential du Bureau International des Poids et Mesures”, *Metrologia*, Vol. 2, pag. 13-23, 1996.
- [9] J. Schwider et al, “Digital Wave-front Measuring Interferometry: Some Systematic Error Sources”, *Applied Optics*, Vol. 22, pag. 3421-3432, 1983.
- [10] J. Schwider, “Advanced Evaluation Techniques in Interferometry”, *Progress in Optics*, Vol. XXVIII, ed. E. Wolf, Elsevier, Amsterdam Schwider, 1990.
- [11] K. Creath, “Phase-shifting Speckle Interferometry”, *Applied Optics*, Vol. 24, pag. 3053-3058, 1985.
- [12] K. Creath, “Phase-Shifting Holographic Interferometry”, *Holographic Interferometry*, ed. P.K. Rastogi, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [13] C. Joenathan, “Phase-measuring Interferometry: New Methods and Error Analysis”, *Applied Optics*, Vol. 33, pag. 4147-4155, 1994.
- [14] P. Wizinovich, “Phase Shifting Interferometry in the Presence of Vibration: a New Algorithm and System”, *Applied Optics*, Vol. 29, pag. 3271-3279, 1990.
- [15] P. Hariharan *et al.*, “Digital Phase-shifting Interferometry: a Simple Error-compensating Algorithm”, *Applied Optics*, Vol. 26, pag. 2504-2505, 1987.
- [16] J. Bruning, et al., “Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses”, *Applied Optics*, Vol. 13, pag. 2693-2703, 1974.
- [17] C. Morgan, “Least-squares Estimation in Phase-measurement Interferometry”, *Optical Letters*, Vol. 7, pag. 358-370, 1982.
- [18] K. Larkin & B. Oreb, “Interferometry: Techniques and Analysis”, *SPIE Proc.*, Vol. 1755, 1992.
- [19] K. Larkin & B. Oreb, “Design and Assessment of Symmetrical Phase-shifting Algorithms”, *J. OSA (A)*, Vol. 9, pag. 1740-1748, 1992.

- [20] J. Monteiro et al., “A miniaturized electronic speckle pattern interferometer”, *Mechanics in Design Symposium* 96, Hamilton, Canada, 7-9 May 1996.
- [21] T. Restivo e Fernando Santos, “Sensor de fibras ópticas por microcurvatura”, Relatório interno INEGI, 1994.
- [22] T. Kreis, “Holographic interferometry – Principles and methods”, *Rastogi Ed. Springer-Verlag*, 1994
- [23] T. Judge et al., “Holographic deformation measurement by Fourier transform technique with automatic phase unwrapping”, *Optical Engineering*, vol 31, pag. 533-537, 1992.
- [24] E. Colon, “Traitement numérique d’images interférométriques”, *Tese de doutoramento*, Univ. Haute-Alsace, 1994.
- [25] L. Mertz, “Real-time Fringe-pattern Analysis”, *Applied Optics*, Vol. 22, pag. 1535-1539, 1983.
- [26] K. Womack, “Interferometric Phase Measurement Using Spatial Synchronous Detection”, *Optical Engineering*, Vol. 23, pag. 391-395, 1984.
- [27] J. Sirkis, Y. Chen, H. Singh, A.Y. Cheng, “Computerized Optical Fringe Pattern Analysis in Photomechanics: a Review”, *Optical Engineering*, Vol. 31, pag. 304-314, 1992.
- [28] W. Macy, “Two-dimensional Fringe-pattern Analysis”, *Applied Optics*, Vol. 22, pag. 3898-3901, 1983.
- [29] D. Williams, N. Nassar, J. Banyard & M. Virdee, “Digital Phase-step Interferometry: a Simplified Approach”, *Optical Laser Technology*, Vol. 23, pag. 147-150, 1991.
- [30] KODAK MEGAPLUS Remote Panel Software – User Manual, 91000074-001 Ver. A, EASTMAN KODAK COMPANY – Motion Analysis Systems Division.

CAPÍTULO 5

SISTEMAS DINÂMICOS DE INTERFEROMETRIA DE SPECKLE

5.1 – Portadora espacial em Interferometria de <i>Speckle</i>	5.2
5.1.1 – Portadora especial nas franjas primárias	5.4
5.1.2 – Portadora especial nas franjas secundárias	5.8
5.2 – Sistemas de Holografia-TV pulsada	5.9
5.2.1 – Sistema Rubi/Kodak	5.9
5.2.2 – Sistema Nd:YAG/Sony	5.10
5.2.3 – Dupla iluminação	5.13
5.2.4 – Dupla referência	5.19
5.3 – Sistemas de <i>Shearography</i> pulsada	5.21
5.3.1 – Interferómetro de Mach-Zehnder	5.21
Referências	5.24

O **capítulo 5** é dedicado ao estudo dos sistemas dinâmicos de Interferometria de Speckle utilizados no âmbito desta tese. As configurações ópticas passíveis de serem utilizadas com fontes de luz pulsadas são apresentadas e descritas em detalhe. Para a medição de deslocamentos fora do plano, utilizando a Holografia-TV, dois tipos de montagem são descritas:

- Utilização de uma frequência portadora espacial nas franjas primárias;
- Utilização de uma frequência portadora espacial nas franjas secundárias.

Os sistemas desenvolvidos permitem aproveitar as vantagens das fontes de luz pulsadas na gravação de padrões de speckle e na sua posterior quantificação através do cálculo de fase óptica.

Os sistemas de shearography são também analisados. Descreve-se o desenvolvimento de um sistema de shearography capaz de ser utilizado com técnicas de modulação espacial da fase. Esta configuração, utilizada pela primeira vez em aplicações de CND, baseia-se no interferómetro de Mach-Zehnder. A descrição desta configuração que permite o cálculo de fase a partir de registos com fontes de luz pulsadas, é apresentado.

Deve-se referir que o capítulo 7 é inteiramente dedicado a este tipo de interferómetro de speckle.

5.1 – PORTADORA ESPACIAL EM INTERFEROMETRIA SPECKLE

As técnicas de Interferometria de Speckle quando utilizadas com lasers pulsados permitem a medição de deslocamentos ou deformações de estruturas devidas a fenómenos dinâmicos. Desta forma é possível obter, com elevada resolução e sem contacto, as deformações associadas à propagação de ondas de tensão geradas por impactos ou por vibrações de frequência elevada. Dado que os tempos de exposição raramente excedem as dezenas de ns é também possível, com o registo pulsado, aliviar consideravelmente as restrições impostas à estabilidade mecânica das montagens ópticas. Esta última característica é de grande utilidade quando se pretende efectuar medições em ambiente industrial.

A utilização destas técnicas implica o recurso a lasers pulsados e a sistemas vídeo com registo assíncrono com capacidade de sincronização externa. O sinal de sincronismo pode ser activado pelo laser, no caso dos lasers de Nd:YAG, ou directamente pelo objecto, no caso dos lasers de Rubi.

Na Interferometria de Speckle pulsada registam-se padrões obtidos em dois estados de excitação da estrutura sucessivos. Durante a realização destes registos dois parâmetros vão influenciar as características do padrão de speckle:

- o deslocamento dos diferentes pontos da estrutura durante cada exposição;
- o deslocamento relativo entre os dois instantes.

Para o primeiro parâmetro é necessário que a estrutura se mantenha estável durante o tempo de exposição, pois só desta forma se obterá um padrão de *speckle* de elevado contraste. O movimento relativo da estrutura deverá ser inferior a $\lambda/10$, durante o tempo de exposição. Quando se utiliza um *laser* pulsado a duração dos impulsos é da ordem de 20 ns, para os *lasers* de Rubi e de 10 ns para os *lasers* de Nd:YAG. Desta forma até uma velocidade de deslocamento relativo do objecto de alguns m/s nenhuma precaução especial é necessária para fixar o instante do fenómeno a estudar. A utilização de *lasers* de impulsos permite dispor de quantidades de energia necessárias a sensibilizar os detectores CCD em intervalos de tempo tão curtos.

Para o segundo parâmetro, limita-se a amplitude do deslocamento relativo entre dois estados, através do envio de dois impulsos *laser* muito próximos. O intervalo de tempo entre impulsos, Δt , é normalmente ajustável. Para os *lasers* de Rubi o intervalo de tempo é regulável entre 1 μ s e 800 μ s, logo, para uma velocidade de 7 m/s a amplitude do deslocamento será de 7 μ m para 1 μ s de Δt , o que, em princípio, não coloca problemas [1].

Combinando tempos de exposição curtos, separados por intervalos de tempo no domínio dos microsegundos, é possível acompanhar no local o comportamento dinâmico de uma estrutura ultrapassando os problemas das vibrações parasitas.

Este tipo de medida foi até meados da década de 90 realizado, de forma qualitativa, recorrendo às técnicas de Interferometria Holográfica. Para que estes fenómenos pudessem ser registados em vídeo, através das técnicas de Interferometria de *Speckle*, era necessário que os sensores de CCD fossem capazes de adquirir, de forma assíncrona, dois padrões de *speckle* separados por intervalos de tempo da ordem do microsegundo. Um sensor CCD convencional permite realizar esta operação se os dois padrões de *speckle* são registados em quadros independentes da imagem (quadro par/quadro impar) e separados por intervalos de tempo que respeitem a temporização vídeo *standard*. Esta operação implica, no entanto, a diminuição da resolução da medida. Outras soluções foram testadas, recorrendo a fibras ópticas posicionadas convenientemente para efectuar registos codificados numa só imagem [2,3]. Contudo, estas soluções implicam uma menor resolução e são difíceis de implementar dado o rigor imposto no alinhamento dos feixes.

O aparecimento dos sistemas vídeo com registo assíncrono veio eliminar esta restrição e permitir soluções com as quais é possível obter registos em dupla exposição sem perda de resolução. Desta forma são obtidos ficheiros numéricos passíveis de tratamento posterior por processamento de imagem. Vários algoritmos de processamento de imagem permitem obter a distribuição espacial da fase em medições interferométricas. Estes algoritmos podem ser divididos em duas categorias: temporais e espaciais [4]. No estudo de fenómenos estáticos ou quasi-estáticos vulgarizou-se a utilização de algoritmos de modulação temporal de fase para a quantificação dos deslocamentos. Contudo, os fenómenos dinâmicos não se compadecem com os elevados tempos necessários ao registo das três ou mais imagens necessárias a estes algoritmos. Desta forma é necessário dispor de métodos que permitam quantificar a fase de cada um dos registos de *speckle* ou do padrão de franjas secundárias independentemente. Uma primeira solução foi proposta por Crawforth em 1990 através de um sistema de dupla referência e dupla exposição [5]. Com um tal dispositivo é possível

realizar o *phase shift* entre os dois feixes de referência e gravar os três interferogramas necessários ao cálculo de fase. No entanto, esta técnica, não pode ser aplicada a sistemas de Holografia-TV porque a dupla exposição exige um meio de registo diferente do inicial, um holograma intermédio é necessário.

Nas técnicas espaciais os mapas de fase são obtidos por desmodulação de uma frequência portadora espacial introduzida nos padrões interferométricos. Esta portadora consiste numa rede de franjas que, dependendo do tipo de configuração óptica utilizada, pode ser incluída no *speckle* primário ou nas franjas secundárias dos interferogramas. Diferentes soluções foram propostas para gerar a frequência portadora [6,7,8].

Se a portadora se encontrar nas franjas primárias, a sua desmodulação é feita para cada registo sendo a distribuição de fase do interferograma obtida por subtracção. Quando a frequência portadora está nas franjas secundárias, a desmodulação envolve apenas um interferograma e conduz directamente ao mapa de fase.

Para o primeiro caso existem algoritmos como o *sinusoidal fitting* [9], a holografia digital [10] e o cálculo de FFT [11]. Em todas elas a frequência portadora deve ser ajustada de forma a poder ser resolvida pelo detector. Como o *speckle* também deve ser resolvido pelo detector, a sua presença impõe algumas limitações à frequência máxima admitida no padrão interferométrico, para a obtenção de uma correcta desmodulação.

Quando uma frequência portadora é introduzida nas franjas secundárias o seu valor deve também ter em conta o valor da deformação máxima esperada, pois a largura de banda da modulação não deve incluir o termo contínuo no domínio das frequências [12]. Apesar desta última limitação implicar o conhecimento prévio dos valores máximos de deformação as configurações ópticas são extremamente simplificadas.

Para a introdução de frequências portadoras espaciais nos padrões de *speckle* é necessário que as frentes de onda que os originam se cruzem segundo um determinado ângulo. Este, por sua vez, deverá ser ajustado de acordo com a frequência máxima admissível pela resolução do CCD. Para a introdução de uma portadora nas franjas secundárias é necessário aplicar ao objecto uma rotação de corpo rígido ou rodar um dos feixes que interferem, entre a realização dos registos. Dado os reduzidos tempos disponíveis entre impulsos a rotação do objecto não é normalmente utilizada, sendo a portadora espacial obtida, ou por rotação do feixe de referência, ou por rotação do feixe de iluminação. Nos parágrafos seguintes os diferentes dispositivos de introdução da frequência portadora, quer nos padrões primários, quer nos padrões secundários, são apresentados e discutidos.

5.1.1 – PORTADORA ESPACIAL NAS FRANJAS PRIMARIAS

A determinação da distribuição de fase resultante da deformação dinâmica de um objecto através de técnicas de Holografia-TV implica o recurso a uma fonte de luz pulsada, ou estroboscópica, a uma configuração óptica capaz de introduzir uma rede de franjas no padrão primário de *speckle* e a um sistema de aquisição vídeo. Só assim, as duas imagens registadas contêm a informação necessária ao cálculo de fase do interferograma.

Enquanto os sistemas vídeo com registo assíncrono não estiveram disponíveis foram utilizadas soluções para codificar espacial e temporalmente a informação de fase em registos vídeo convencionais. Como foi descrito anteriormente, foi desenvolvido neste trabalho um sistema de sincronismo com o qual foi possível registar em duplo impulso padrões de *speckle* com um laser pulsado de Nd:YAG e um sistema vídeo convencional (sistema MICAM). As severas restrições impostas pela temporização vídeo e a perda de resolução não aconselharam a utilização deste sistema a partir do momento em que ficaram disponíveis soluções mais eficientes.

Recorrendo a uma dupla referência e a um sistema de modulação de fase por célula de Pockels, Pedrini utilizou duas fibras ópticas para gerar o par de feixes de referência, como se representa na figura 5.1, e propôs uma solução que permite obter mapas de fase [13]. Estas fibras estão colocadas de forma a fazerem um ligeiro ângulo com a vertical (fibra V) e com a horizontal (fibra H) do eixo óptico de forma a gerarem frequências espaciais nos padrões primários. A extracção da fase pode ser obtida por algoritmos semelhantes aos utilizados nas técnicas espaciais aproveitando o facto de haver uma modulação de fase ao longo de cada *speckle*. Estes algoritmos são fortemente penalizados em termos de resolução pois cada registo é separado em três ou mais imagens de acordo com a inclinação do feixe de referência, sendo a resolução espacial do detector CCD que impõe o ângulo máximo admissível ($\sim 1^\circ$).

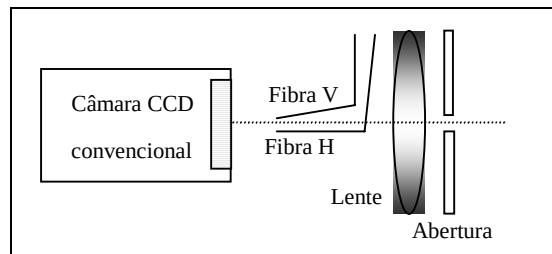


Figura 5.1 – Sistema de dupla-referência para geração de portadoras vertical e horizontal.

A comutação entre os dois feixes de referência é assegurada por separação espacial obtida por uma célula de Pockels e um PBS (*polarisation beam splitter*) da forma descrita na figura 5.2. Neste caso a célula de Pockels é activada durante o intervalo de tempo que medeia o par de impulsos.

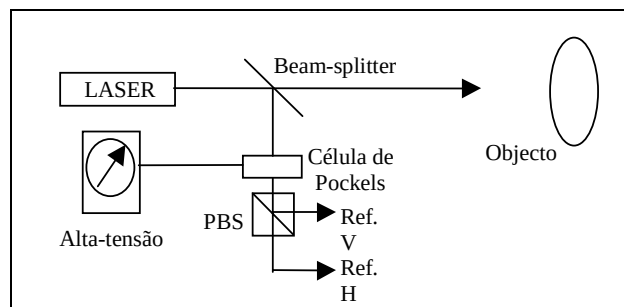


Figura 5.2 – Diagrama da utilização de uma célula de Pockels para criar duas frequências portadoras.

A principal vantagem desta técnica consiste na utilização de uma câmara convencional e foi de grande utilidade enquanto não foram desenvolvidas as câmaras de registo assíncrono. No entanto, as grandes dificuldades de alinhamento das fibras ópticas, bem como a necessidade de utilizar uma célula de Pockels externa fizeram com que esta técnica não tivesse grande divulgação. Na figura 5.3 representa-se esquematicamente a separação dos dois impulsos e obtenção do mapa de fase. A determinação destes mapas de fase pode ser realizada recorrendo a transformadas de Fourier, que neste caso deverão ser aplicadas separadamente em ambos os eixos.

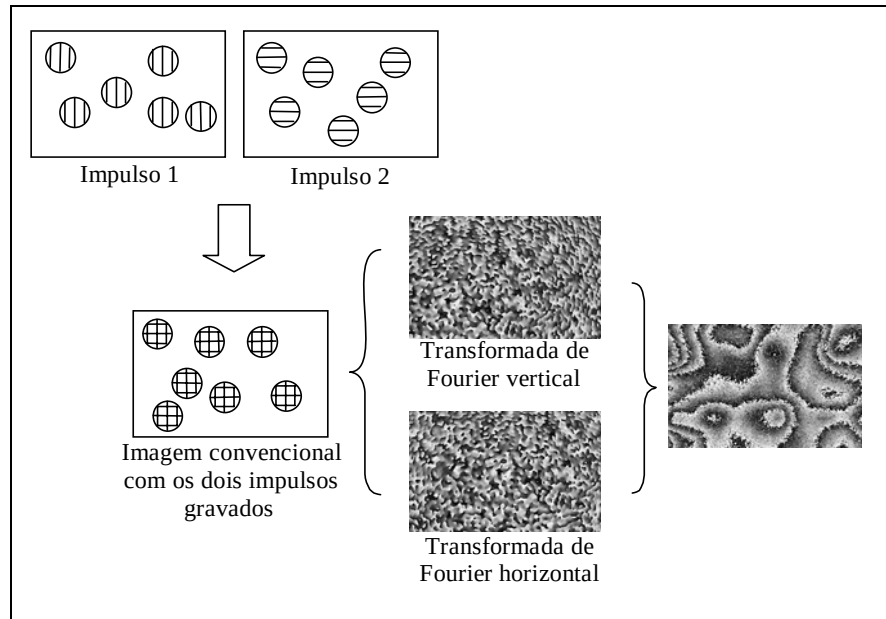


Figura 5.3 – Obtenção do mapa de fase por desmodulação de frequências portadoras horizontais e verticais em duplo impulso e com vídeo convencional.

A principal contribuição da técnica anteriormente descrita para os métodos actuais de cálculo de fase consiste na geração de uma portadora espacial por desalinhamento da referência. Os detectores CCD com registo assíncrono permitem registar separadamente os dois impulsos. Desta forma pode ser utilizada a mesma portadora espacial para calcular a fase de cada um dos registos. Os sistemas actuais utilizam apenas um feixe de referência ligeiramente inclinado para obter os mapas de fase, como se pode observar na figura 5.4.

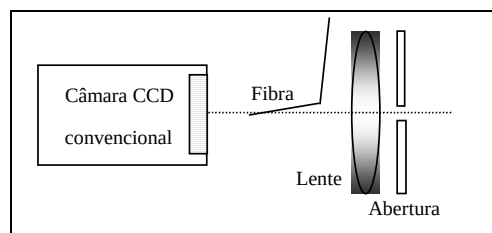


Figura 5.4 – Sistema de referência única para geração de portadora.

Os algoritmos actualmente utilizados recorrem a operações realizadas no domínio das frequências espaciais, FFT ou *sinusoidal fitting*, para realizar a desmodulação da portadora espacial introduzida e obter a distribuição espacial de fase de cada um dos registos. Os interferogramas são obtidos directamente por subtracção. Uma representação esquemática deste processo pode ser vista na figura 5.5.

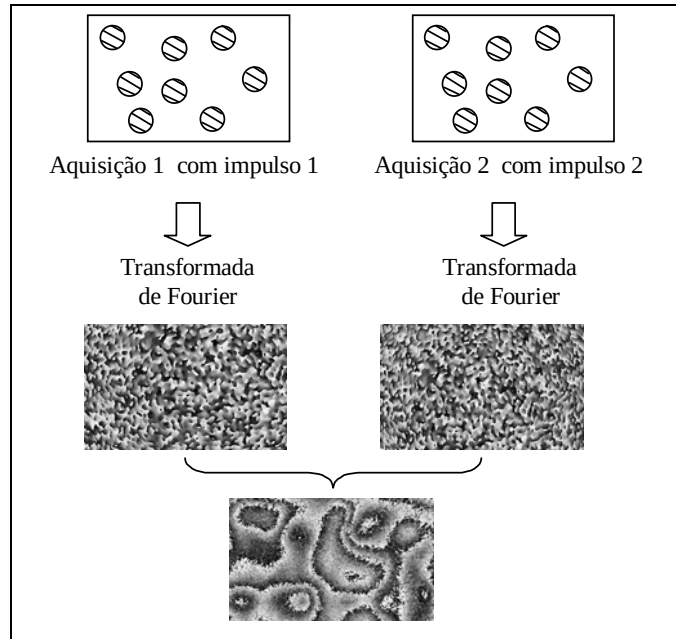


Figura 5.5 – Obtenção do mapa de fase por desmodulação de uma única frequência portadora em duplo impulso e registo assíncrono.

Embora a orientação da portadora possa ser qualquer é frequente optar por orientá-la perpendicularmente à direcção de varrimento vídeo, direcção de maior resolução temporal. Mantém-se, contudo, a necessidade de operar com um *speckle* de grandes dimensões, cobrindo 3 ou mais pixels, o que implica uma menor eficiência óptica. No entanto, dado que só existe uma frequência portadora é possível utilizar aberturas rectangulares, que apenas aumentam o tamanho do *speckle* ao longo de uma direcção e admitem mais luz.

Uma outra solução passível de utilização para determinação de fase em registos de Interferometria de *Speckle* foi desenvolvida no LOME por Chousal [14]. Neste caso a portadora espacial é gerada naturalmente na interferência do feixe referência com o feixe objecto como acontece numa montagem holográfica clássica. Controlando a dimensão do objecto, o ângulo entre os feixes, a distância ao detector e utilizando uma referência colimada é possível registar electronicamente hologramas de Fresnel. Apesar da simplicidade da montagem, designada por holografia digital, e da qualidade dos resultados obtidos, as restrições impostas à geometria da montagem e às dimensões do objecto não permitem a utilização além das aplicações laboratoriais.

5.1.2 – PORTADORA ESPACIAL NAS FRANJAS SECUNDÁRIAS

Actualmente a solução mais utilizada para determinar a fase num interferograma pulsado obtido por Interferometria de *Speckle* recorre a uma portadora no padrão de *speckle* primário e utiliza a desmodulação recorrendo a técnicas de FFT ou *sinusoidal fitting*. Esta solução apresenta, contudo, uma baixa eficiência luminosa e exige um preciso alinhamento dos feixes que interferem. Nas soluções comerciais a montagem é normalmente incluída numa caixa fechada onde todos os elementos ópticos se encontram devidamente fixados.

Em situações em que não se possa dispor de soluções deste tipo ou seja necessária uma maior eficiência é possível recorrer a outra solução. Esta alternativa foi proposta pelo autor no âmbito de um projecto BRITE – PDHS – para ser utilizada com um laser de Nd:YAG de dupla cavidade e recorre à introdução de uma frequência portadora no padrão de franjas secundárias [15]. Outras soluções, que diferem da primeira na forma como é gerada a frequência espacial utilizada para codificar a fase, foram propostas por Chalvidan [16] e Santoyo [17].

A determinação da fase a partir dos padrões de *speckle* secundários acarreta no entanto alguns inconvenientes. A interligação entre a frequência portadora e a deformação a medir fazem com que a obtenção de resultados esteja condicionada pelo conhecimento, *à priori*, da amplitude da deformação. A primeira é limitada superiormente pela resolução do detector enquanto a amplitude máxima admissível é limitada pela frequência da portadora utilizada. Existe ainda outra severa restrição na utilização destes métodos. Dado que todos os padrões de *speckle* têm ruído espacial, a utilização deste método com grandes amplitudes de deformação implica uma maior dispersão do termo de sinal e, consequentemente, uma maior admissão de ruído [15].

A introdução de uma frequência espacial como portadora da deformação implica uma alteração nas condições de propagação dos dois impulsos. Esta alteração pode ser obtida por movimento do objecto ou rotação de um dos feixes do interferómetro. A segunda solução sendo a mais vulgar pode ser facilmente obtida se for utilizado um sistema laser de dupla cavidade, solução muito vulgar nos lasers de Nd:YAG para aplicação em Mecânica Experimental. A geração de dois impulsos em cavidades diferentes permite jogar com a sua polarização para obter a sua separação espacial de forma simples, que será descrita mais adiante.

O que acima foi dito aplica-se directamente às montagens de Holografia-TV definidas como sendo aquelas que permitem a medição de deslocamentos. No caso de montagens de *shearography*, para medição de gradientes de deslocamento fora do plano, é também possível obter montagens equivalentes. Para introdução de uma frequência portadora nos padrões de franjas primários poderá ser utilizada a montagem proposta pelo autor e que será descrita no parágrafo 5.3. Para a introdução de uma portadora nas franjas secundárias poderá utilizar-se a montagem proposta por Templeton [18].

5.2 – SISTEMAS DE HOLOGRAFIA-TV PULSADA

Durante a realização deste trabalho foram utilizados alguns dos sistemas que anteriormente foram descritos. Enquanto os sistemas utilizados no LOME foram desenvolvidos pelo autor, as medições realizadas durante a sua estada na HOLO3 foram obtidas com um sistema já desenvolvido. Embora todos os sistemas possam ser utilizados para medições globais em estaleiro o trabalho realizado no LOME foi exclusivamente laboratorial. Em seguida é feita uma descrição dos vários sistemas de Holografia-TV pulsada utilizados pelo autor ao longo da realização deste trabalho.

5.2.1 – SISTEMA RUBI/KODAK

Trata-se de um sistema de medida baseado na iluminação por um laser de Rubi e registo de interferogramas numa câmara digital de alta resolução. Uma montagem semi-laboratorial, como se representa na figura 5.6, é utilizada no encaminhamento de ambos os feixes do interferómetro até ao CCD.

Enquanto o feixe de referência é encaminhado através de uma fibra óptica directamente para a superfície do detector, o feixe objecto é recolhido por um sistema formador de imagem que inclui duas lentes fotográficas. Um sistema de ajuste micrométrico X-Y é utilizado para gerar o desalinhamento do feixe de referência relativamente ao eixo óptico do sistema e assim obter a frequência portadora desejada.

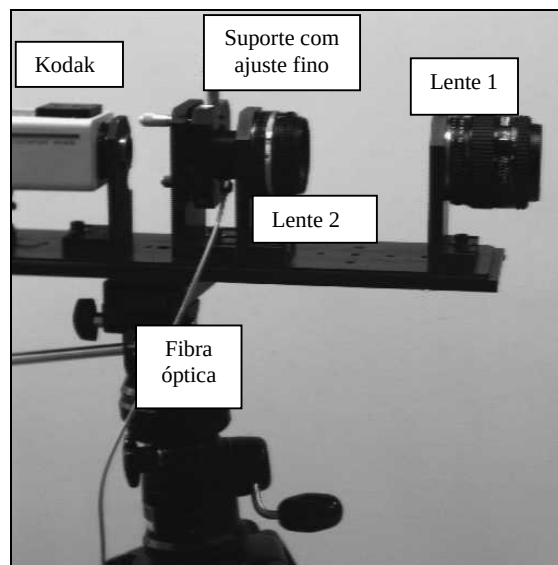


Figura 5.6 – Realização do interferómetro no sistema Rubi/Kodak.

O ajuste inicial do sistema é feito por tentativas fazendo variar a posição da fibra óptica até obter uma portadora o mais uniforme possível em toda a imagem. O facto desta montagem utilizar dois feixes com frentes de onda de diferentes curvaturas acarreta uma variação da frequência portadora ao longo da imagem. Um desalinhamento excessivo da saída do feixe de referência implica uma frequência acima da resolução do detector e consequentemente zonas da imagem sem informação de fase consistente. Este ajuste seria evitado recorrendo a um feixe de referência colimado [19].

O registo dos padrões de *speckle* é obtido através de uma câmara CCD digital de funcionamento assíncrono capaz de registar pares de imagens com uma separação temporal mínima de 5 μ s. Esta câmara está equipada com uma matriz sensora de 1024 x 1024 pixels. Contudo, a utilização desta câmara para registar padrões de *speckle* em duplo impulso não permitia uma completa utilização da área útil do detector. Os tempos de acesso ao *buffer* de imagem limitam a dimensão máxima das imagens a 1000 x 800 *pixels* [19].

A obtenção dos mapas de fase é conseguida através de um algoritmo baseado na desmodulação por FFT. A desmodulação da portadora é ajustada a partir da contagem das franjas em cada grão de *speckle*. Esta contagem fornece também, através de um algoritmo desenvolvido pela HOLO3, um parâmetro de ajuste para a filtragem.

Nos sistemas de Holografia-TV pulsada é necessário dispor de um sistema de geração de sinais que permita sincronizar todos os componentes: laser, câmara e objecto. O funcionamento do laser de Rubi permite a operação em duplo impulso sem bombeamento contínuo da cavidade ressonante pelo que pode ser utilizado com os seus disparos determinados pelo evento a estudar. Desta forma, um sinal gerado na excitação do objecto alimenta um circuito gerador de atrasos responsável pelo disparo do laser e pelo registo de imagens. Na sincronização do sistema foi utilizado um gerador de atrasos com uma resolução de 1 μ s construído pela empresa Steinbichler.

Este sistema interferométrico revelou-se de fácil utilização conduzindo a resultados de grande qualidade. Contudo, trata-se de um sistema semi-laboratorial que deverá ser operado por alguém com experiência na utilização destas técnicas.

Um sistema mais recente, idêntico ao utilizado pelo autor na HOLO3, foi adquirido pelo LOME à empresa Ettemeyer. Neste sistema, mais vocacionado para aplicações industriais, toda a montagem óptica está inserida numa caixa fechada, sem qualquer necessidade de ajuste mecânico. A utilização de uma referência colimada e o ajuste por *software* actuando no domínio das frequências permite que este sistema possa ser operado por técnicos menos qualificados.

5.2.2 – SISTEMA ND:YAG/SONY

Enquanto estavam disponíveis apenas os sistemas de vídeo convencional pensou-se que a melhor estratégia para desenvolver sistemas de Holografia-TV seria optar por sistemas laser que permitissem a operação em

modo repetitivo à frequência vídeo. Desta forma seria possível registar 25 interferogramas por segundo controlando apenas o tempo entre os impulsos geradores dos interferogramas. Dado que os lasers de Rubi estão limitados a uma frequência de repetição de apenas alguns Hz o LOME decidiu, a meio da década de 90, adquirir um sistema laser baseado em osciladores de Nd:YAG. Como a principal aplicação deste laser era a Mecânica Experimental a separação entre impulsos extraídos de uma só cavidade não é compatível com a maior parte dos fenómenos dinâmicos que se pretendiam estudar. Nestes lasers a separação máxima entre impulsos não pode exceder 400 μ s para o mesmo ciclo de *flash*, razão pela qual são normalmente utilizados dois osciladores independentes. Estes sistemas de dupla cavidade permitem aumentar a separação entre impulsos para intervalos da ordem de 1 ms. O sistema existente no LOME foi adquirido à empresa Continuum e consiste numa dupla cavidade, oscilador e amplificador, capaz de produzir impulsos com uma energia de 180 mJ a uma frequência máxima de 50 Hz.

A primeira solução ensaiada consistiu na utilização do sistema MICAM, anteriormente descrito, para registar os padrões de *speckle*. Embora tenham sido obtidas com sucesso algumas medições realizadas sobre corpos em movimento, as limitações do sistema e a aquisição de uma câmara de registo assíncrono vieram contribuir para que o desenvolvimento deste sistema fosse interrompido.

O sistema MICAM foi substituído por uma câmara de CCD com registo assíncrono fabricada pela SONY e adaptada a este tipo de operação. Trata-se de uma câmara analógica de 750 x 570 *pixels* com digitalização interna do sinal vídeo e capacidade para armazenar temporariamente, através de uma memória externa, um dos registos interferométricos. Esta câmara pode ser operada em contínuo ou sincronizada externamente podendo, neste caso, adquirir pares de imagens com uma separação mínima de 3 μ s.

Na figura 5.7 esta representada a montagem interferométrica realizada para efectuar os registos dos padrões de *speckle* obtidos a partir de fenómenos dinâmicos. Nesta figura pode observar-se do lado direito a câmara CCD SONY e na parte superior o suporte utilizado no posicionamento da fibra óptica que gera a referência.

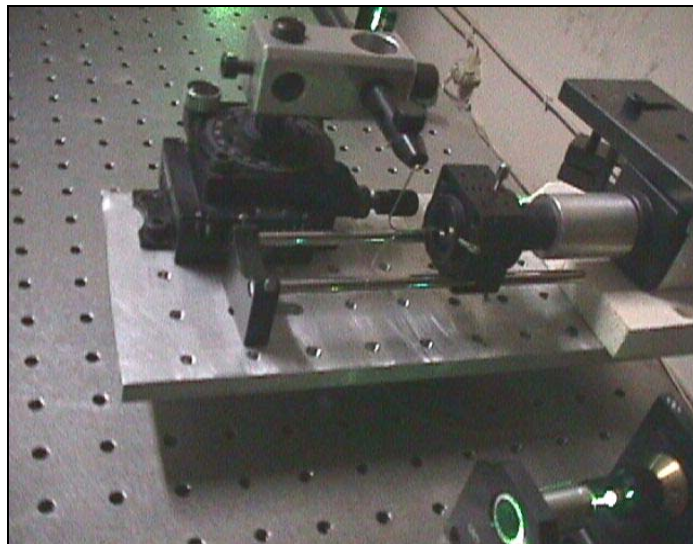


Figura 5.7 – Realização do interferómetro no sistema Nd:YAG/LOME/SONY.

Esta montagem permitiu obter interferogramas com um elevado contraste, semelhante ao obtido com a iluminação contínua.

Para sincronizar o sistema foi construído um circuito electrónico gerador de atrasos adaptado às necessidades impostas pelo laser de Nd:YAG. O circuito construído, já descrito anteriormente, é de fácil operação e permite, além dos sinais já referidos, gerar um sinal para controlo de um *shutter* mecânico. Este último elemento permite operar o *laser* a uma frequência de repetição constante (funcionamento normal do laser) e extrair apenas o par de impulsos necessários à medição. Nesta situação é o *laser* que controla o desencadear dos sinais de sincronismo sendo aproveitado o ciclo *laser* anterior para gerar os sinais necessários à medição com o ciclo seguinte.

Com a utilização desta câmara foram consideravelmente aliviadas as restrições impostas no sistema de medida pelo detector MICAM. Neste caso são obtidas imagens completas com as quais foram realizados interferogramas de muito bom contraste.

Este sistema foi ainda testado substituindo a câmara SONY pela câmara digital Kodak idêntica à utilizada no sistema HOLO3. Em colaboração com a equipa da HOLO3 foi possível desenvolver novos *drivers* para operar a câmara e com os quais se obtiveram registos com 1024 x 1024 *pixels*.

Na figura 5.8 apresentam-se um registo obtido em *time average* e iluminação contínua obtido numa placa metálica em vibração harmónica e dois obtidos em duplo impulso com a placa a vibrar na mesma frequência de ressonância. Como se pode observar nos interferogramas obtidos em dupla exposição são obtidos padrões de franjas sinusoidais. O aumento da quantidade de franjas no último padrão deve-se a uma maior separação entre impulsos. Como se pode observar todos os padrões apresentam um óptimo contraste. Enquanto o primeiro foi obtido em *time average* com iluminação contínua e redução do ruído de speckle numa câmara *standard* os dois últimos foram gravados com uma câmara de alta resolução e iluminação pulsada.

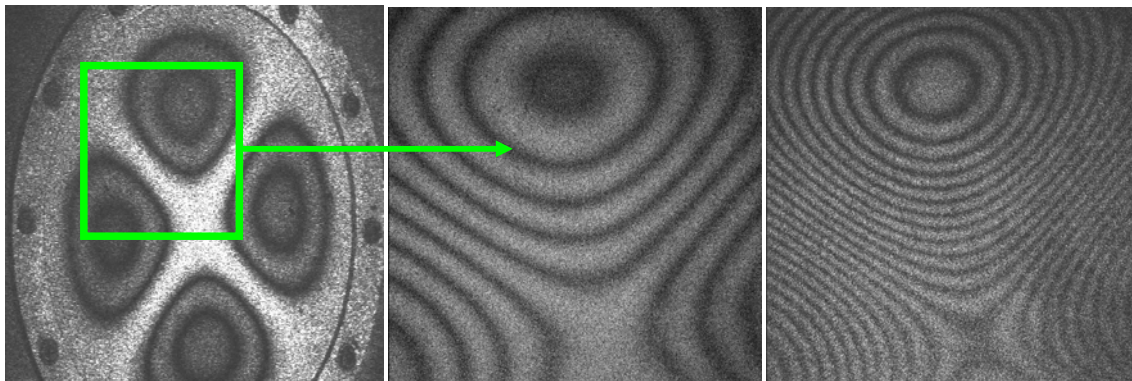


Figura 5.8 – Registo de um modo de vibração de uma placa obtido em *time-average* e dupla-exposição com diferente separação entre impulsos.

O sucesso obtido com este sistema revelou enormes potencialidades de desenvolvimento para aplicações em Mecânica Experimental. O registo assíncrono pode ainda ser utilizado para medir fenómenos transientes que,

não sendo destrutivos, possam ser repetidos e medidos com diferentes separações de impulsos de forma a acompanhar a sua evolução.

A adaptação do sistema para registar um conjunto de interferogramas obtidos sequencialmente implica a selecção de uma placa de imagem com capacidade para armazenar essa informação. Neste caso o *laser* deverá ser operado sem *shutter* sendo as imagens adquiridas até encher completamente o *buffer* da placa. O seu processamento será realizado posteriormente recorrendo aos algoritmos já descritos [20]. Este modo de operação poderá ter interesse para analisar vibrações não estacionárias ou fenómenos transientes de baixa velocidade.

5.2.3 – DUPLA ILUMINAÇÃO

Neste trabalho foi também testado um sistema interferométrico pulsado em que o cálculo de fase é baseado na desmodulação de uma frequência portadora espacial introduzida no padrão secundário. Dadas as dificuldades de alinhamento do feixe de referência foi decidido utilizar uma rotação do feixe de iluminação para criar a portadora. Para gerar a rotação do feixe de iluminação foi decidido recorrer a uma montagem sensível à polarização que fosse facilmente adaptável ao sistema *laser* existente no LOME.

Para a caracterização do sistema foi utilizada uma montagem envolvendo um *laser* contínuo de He-Ne e um *Liquid-Crystal Light Control System (LCR)*. Este último permite variar a polarização de um feixe *laser*, podendo assim, criar dois feixes com polarizações ortogonais e amplitude semelhante. Foi decidido utilizar esta montagem para validar os algoritmos de cálculo de fase e caracterizar o método sem necessidade de trabalhar com os impulsos de elevada energia fornecidos pelo sistema de Nd:YAG.

Utilizando um LCR com um *beam-splitter sensível à polarização*, PBS, está-se perante uma configuração com um comportamento semelhante ao de uma célula de Pockels. A intensidade relativa dos dois feixes pode ser controlada através da d.d.p. aplicada ao LCR. Na figura 5.9 uma representação esquemática do dispositivo utilizado para gerar os dois feixes é apresentada. Trata-se de um dispositivo menos dispendioso do que a célula de Pockels, que não necessita da aplicação de tensões eléctricas elevadas e que tem como principal limitação uma frequência de resposta de cerca de 4 Hz.

O funcionamento deste dispositivo é função da tensão aplicada ao LCR, como se apresenta na figura 5.10. A tensão aplicada altera a birrefringência e, por isso, a polarização que incide no PBS. Assim, o PBS pode gerar dois caminhos diferentes para o feixe de iluminação. Para que os dois feixes de saída tenham a mesma polarização, uma lâmina retardadora de $\lambda/2$ é utilizada num dos caminhos ópticos para rodar a polarização de 90°. Ambos os feixes de iluminação terão a polarização do feixe de referência.

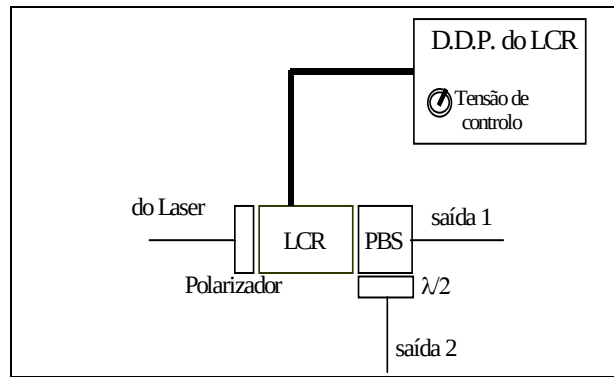


Figura 5.9 – Representação do dispositivo usado para gerar dois feixes polarizados ortogonalmente.

Através de um ajuste cuidadoso da tensão de controlo aplicada, e da introdução de um atenuador para compensar as perdas introduzidas pela lâmina retardadora, é possível obter a mesma intensidade nos dois feixes e, desta forma, obter o máximo contraste das franjas secundárias. Este ajuste é neste caso muito importante pois o cálculo de fase é realizado directamente sobre o padrão de franjas secundárias.

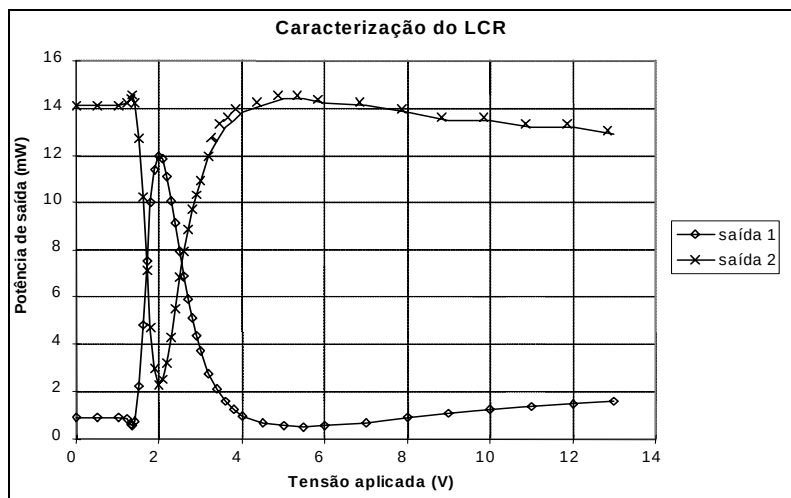


Figura 5.10 – Tensão VS potência de saída para os dois feixes criados por LCR+PBS.

A montagem proposta inicialmente utilizava duas lentes para gerar os feixes de iluminação. Esta configuração revelou algumas dificuldades de ajuste dado que a curvatura das frentes de onda interferia na distribuição espacial da portadora dificultando a obtenção de uma distribuição uniforme ao longo da imagem. Para garantir que as duas frentes de onda da iluminação têm uma curvatura semelhante os feixes incidiam no objecto através da mesma objectiva [21].

De acordo com a configuração da figura 5.11, um *laser* de He-Ne de 18 mW foi utilizado como fonte de luz sendo o feixe de referência conduzido por uma fibra óptica com preservação da polarização.

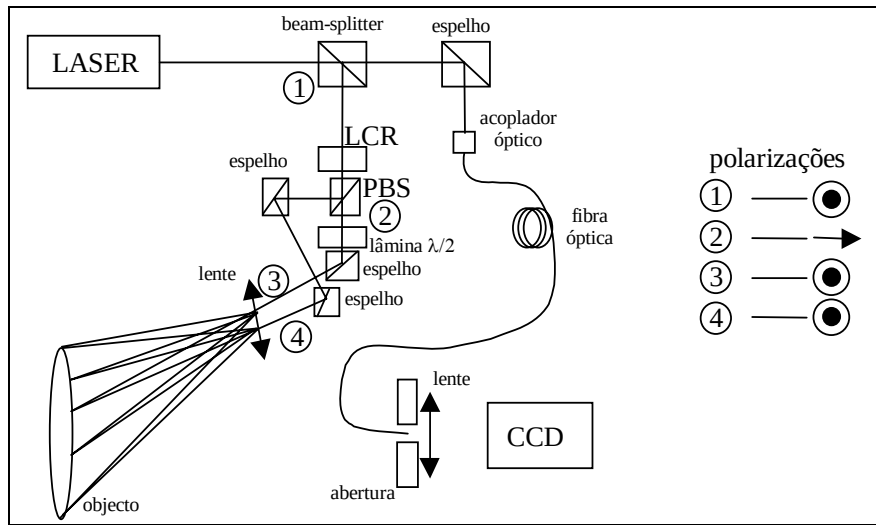


Figura 5.11 – Montagem experimental usada na validação da técnica para introdução de portadora nas franjas secundárias por variação do feixe de iluminação.

A variação do ângulo de entrada permite controlar o passo da portadora, que pode ser calculado através da equação:

$$p = \frac{\lambda}{\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \quad (5.1)$$

onde λ é o comprimento de onda do *laser* e γ é o ângulo entre as duas direcções de iluminação.

Na figura 5.12 podem observar-se três portadoras geradas desta forma. A frequência espacial cresce da esquerda para a direita variando desde as 16 franjas por imagem até às 36. Como é visível na figura esta montagem permite obter padrões de franjas com bom contraste e distribuição uniforme ao longo de toda a imagem. Foram testadas diferentes frequências portadoras ajustadas de acordo com a deformação imposta ao objecto. A máxima frequência utilizada foi de 46 franjas por imagem.

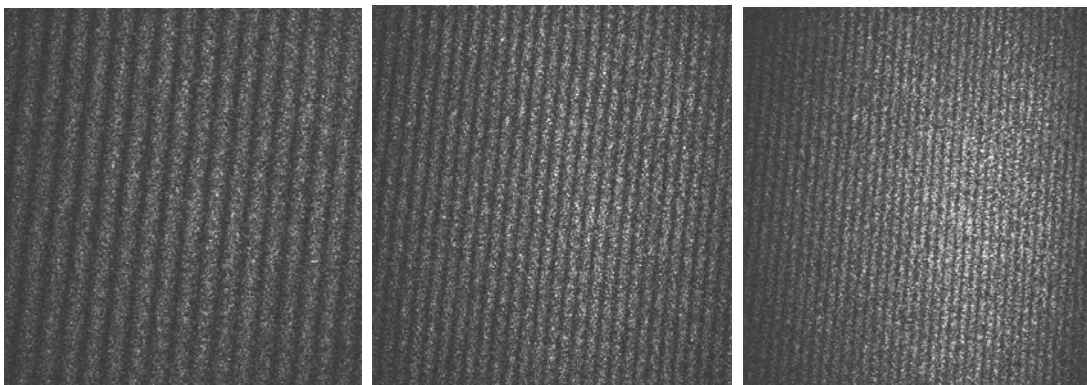


Figura 5.12 – Diferentes frequências portadoras em padrões secundários: 16, 26 e 36.

O cálculo da fase é obtido através da desmodulação da portadora, como foi descrito no capítulo 4. A figura 5.13 representa uma portadora espacial com 26 franjas, o interferograma obtido pela sobreposição da deformação do objecto às franjas portadoras e o mapa de fase correspondente à deformação imposta ao objecto após a desmodulação do sinal por FFT.

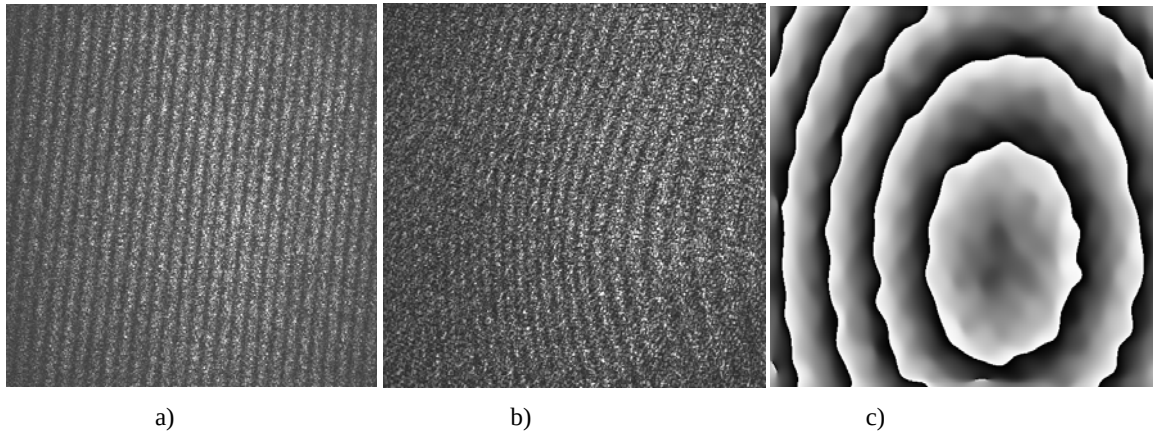


Figura 5.13 a) Frequência portadora b) Frequência portadora + modulação c) Mapa de fase da deformação.

Se a direcção da frequência portadora for bem conhecida, não existe ambiguidade na selecção do lóbulo da FFT que contém o sinal de modulação do objecto no espaço das frequências espaciais.

Os resultados apresentados correspondem a diferentes medições de deslocamento realizados numa placa de aço, com 1 mm de espessura e utilizando 4 frequências portadoras espaciais. Esta placa circular estava encastrada ao longo de todo o seu perímetro. Um parafuso micrométrico foi utilizado para impor deslocamentos normais à superfície desta sendo todas as deformações medidas com o objecto parado.

Seguidamente, na figura 5.14 apresentam-se os resultados obtidos para diferentes deslocamentos, de 0.5 μm a 5 μm , e para diferentes frequências da portadora, 16, 26, 36 e 46 franjas por imagem.

Na figura é possível observar que a portadora de 16 franjas não é suficientemente elevada para permitir a medição de um deslocamento de 5 μm . No plano de Fourier os dois lóbulos da modulação do objecto não estão completamente separados e incluem o termo contínuo.

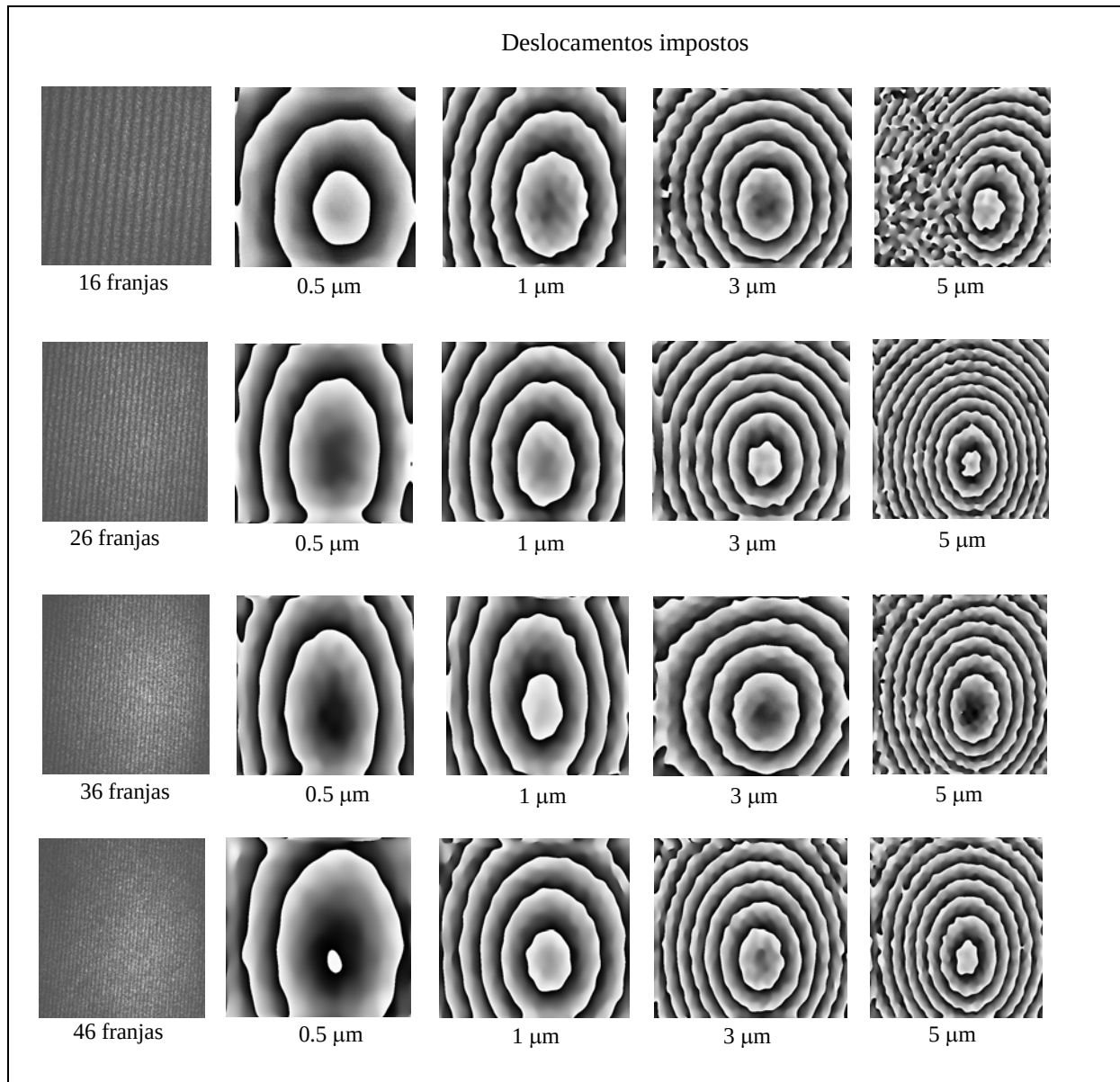


Figura 5.14 a) Frequência portadora; b) Frequência portadora + modulação; c) Mapa de fase da deformação.

Sendo o objectivo deste trabalho desenvolver um método experimental que pudesse utilizar o laser de Nd:YAG disponível foi estudada a possibilidade de adaptar o sistema laser para produzir pares de impulsos com polarizações ortogonais. A figura 5.15 representa a configuração final do sistema laser com o qual seria possível responder às especificações impostas. Como a geração do segundo harmónico é dependente da orientação do vector polarização em relação ao cristal seria necessário que cada cavidade dispusesse de um cristal próprio devidamente orientado [22]. A polarização seria rodada por inclusão de uma lâmina de atraso $\lambda/2$ colocada imediatamente após um dos cristais. A geração de dois feixes com polarizações ortogonais também pode ser obtida através da utilização de uma célula de Pockels sincronizada com o sistema laser.

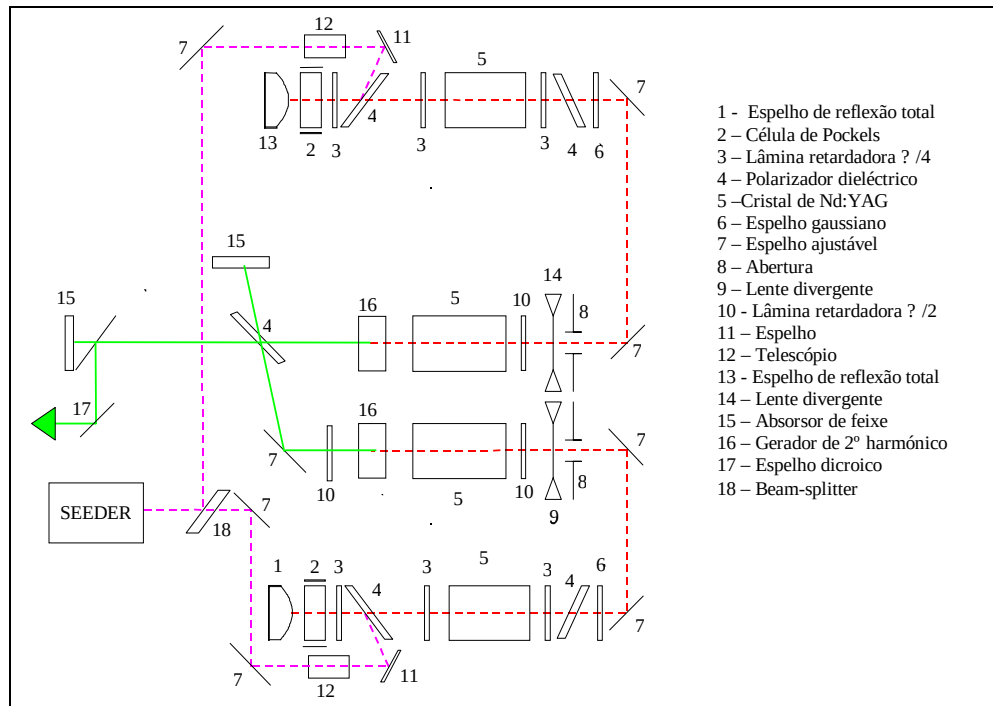


Figura 5.15 – Configuração do sistema dual NY 80-50 para produzir pares de impulsos ortogonais.

A adaptação do sistema *laser* permitiria operá-lo normalmente produzindo pares de impulsos cuja separação espacial seria facilmente obtida recorrendo a um PBS. Na figura 5.16 representa-se esquematicamente a configuração final proposta.

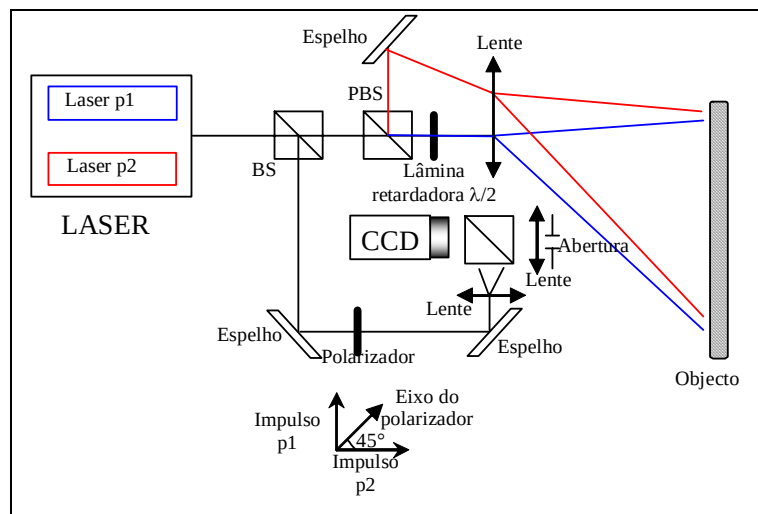


Figura 5.16 – Sistema de dupla iluminação proposto para o laser dual NY 80-50.

No sistema representado um polarizador linear no feixe de referência, com o eixo orientado na bissectriz das duas polarizações emergentes do laser, garante a mesma intensidade dos feixes de referência para os dois impulsos.

Em conclusão pode dizer-se que o dispositivo apresentado, não contendo partes móveis, pode facilmente ser utilizado em sistemas de Holografia-TV pulsados. Se o sistema laser não permitir gerar dois impulsos ortogonalmente polarizados (laser de uma única cavidade, ex. Rubi), uma célula de Pockels pode ser utilizada para criar polarizações ortogonais entre pares de impulsos.

5.2.4 – DUPLA REFERÊNCIA

Uma outra técnica alternativa para criar franjas secundárias nos padrões de *speckle* obtidos por Holografia-TV pulsada pode ser realizada através da variação da direcção de propagação do feixe de referência. A variação da direcção é obtida recorrendo a um espelho rotativo cujo eixo está montado num galvanómetro. Como neste sistema existe uma parte móvel a resposta em frequência deste dispositivo condiciona o tempo entre impulsos. O galvanómetro utilizado exige um tempo mínimo de repouso de 10 ms, ou seja, só estabiliza numa posição 10 ms após lhe ter sido dado essa ordem.

Este sistema adapta-se bem à aquisição sequencial de registos interferométricos, i.é., padrões de *speckle*, se o galvanómetro funcionar à mesma frequência que os impulsos laser. Desta forma são gravadas sequências de registos com referências que variam alternadamente entre duas posições, g_1 e g_2 , como se pode ver na figura 5.17. A figura representa a montagem experimental a realizar para que se consiga a introdução de uma frequência portadora espacial nas franjas secundárias recorrendo à variação da direcção de incidência do feixe de referência no CCD.

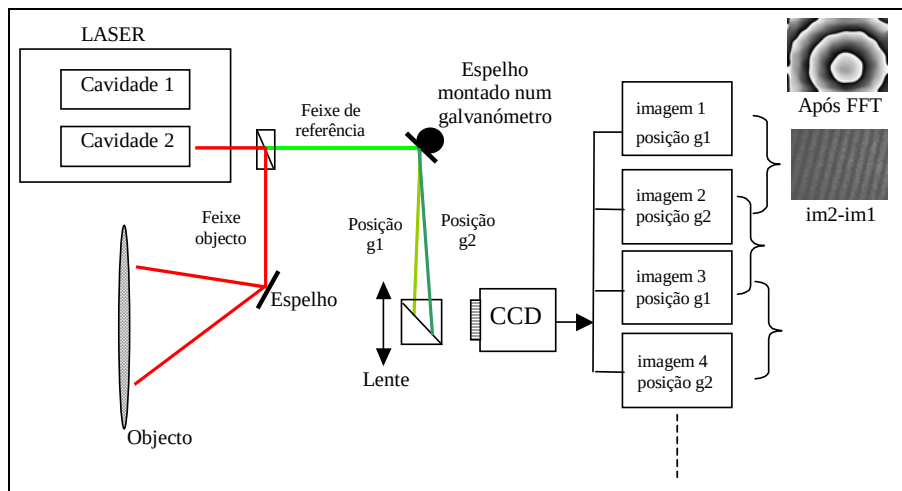


Figura 5.17 – Montagem experimental usada na validação da técnica para introdução de portadora nas franjas secundárias por variação do feixe de referência.

Esta montagem foi inicialmente desenvolvida para aplicações de cine-holografia na medição de fenómenos de baixa velocidade e para obter filmes de hologramas com imagens a 3 dimensões [1].

Na configuração testada, apresentada esquematicamente na figura 5.18, o sistema de iluminação é baseado num laser QUANTEL de Nd:YAG de dupla cavidade a funcionar à frequência de 25 Hz. Nesta configuração apenas uma cavidade é utilizada. À saída do sistema laser os feixes de referência e de iluminação são criados por introdução de um *beam-splitter* 90:10. A rotação do espelho entre dois impulsos, através da tensão aplicada ao galvanómetro, altera a direcção do feixe de referência e introduz um conjunto de franjas regulares no padrão secundário de *speckle*.

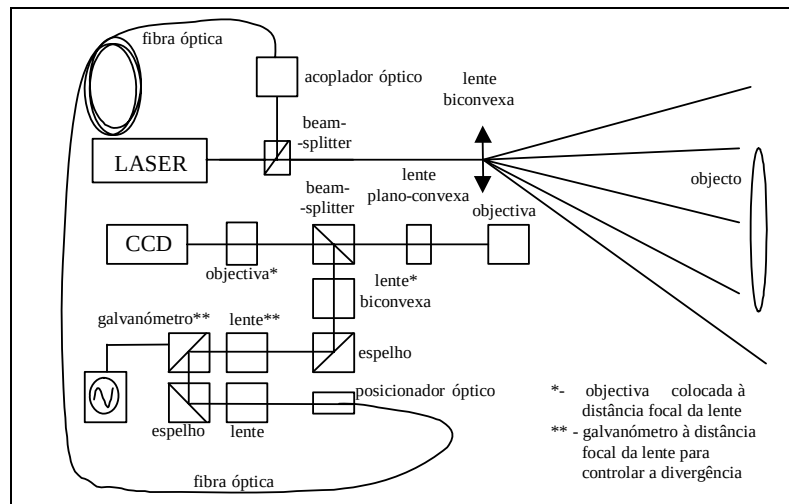


Figura 5.18 – Montagem experimental usada na validação da técnica para introdução de portadora nas franjas secundárias por variação do feixe de referência

Usando uma câmara convencional (25 Hz), com o galvanómetro a oscilar a 12.5 Hz e apenas uma cavidade, podem adquirir-se sequências de imagens separadas por 40 ms. No entanto, a observação de fenómenos rápidos está fora de questão, pois o tempo mínimo entre aquisições está limitado pelo tipo de câmara usada e pelo movimento do galvanómetro.

Nesta montagem a objectiva próxima do objecto é utilizada com o diafragma totalmente aberto para recolher o máximo de luz enquanto a abertura da segunda objectiva, próxima do CCD, é utilizada para controlar o tamanho do *speckle*. Aqui, a aplicação de uma tensão de 0.5 V conduz a uma portadora de 50 franjas por imagem. No entanto, o menor contraste dos padrões obtidos com este sistema não permitia desmodular com rigor a fase de interferogramas quando a portadora tem mais de 20 franjas.

Este sistema poderá ser uma alternativa ao anterior quando se dispuser de um sistema laser com uma só cavidade operada em impulso simples. Estando disponível um laser de dupla cavidade é preferível adaptá-lo para produzir impulsos com polarizações ortogonais e recorrer ao sistema anteriormente descrito. Embora o galvanómetro possa ser uma alternativa à célula de Pockels para fenómenos lentos a diferença de custo é largamente compensada pela frequência de resposta do segundo.

5.3 – *SHEAROGRAPHY* PULSADA

Apesar da indústria aeronáutica ter sido sempre muito reticente à utilização das técnicas ópticas na inspecção de componentes verifica-se que actualmente existe uma crescente aceitação destas técnicas. Hoje em dia as técnicas ópticas, dadas as potencialidades demonstradas, têm vindo a ser progressivamente utilizadas, quer em fase de projecto, quer mesmo durante operações de manutenção. Embora a Holografia-TV esteja melhor adaptada à fase de projecto, situação em que é necessário caracterizar o comportamento mecânico de componentes, a *shearography* tem-se revelado de grande utilidade nas operações de inspecção. O carácter diferencial da medida efectuada com a *shearography* e a maior simplicidade das montagens ópticas permite uma fácil detecção dos gradientes de deslocamento mesmo em ambientes instáveis.

Embora a maior parte dos trabalhos publicados na inspecção de componentes com *shearography* utilize iluminação com lasers contínuos a opção pelos lasers pulsados permitirá eliminar completamente as dificuldades devidas às instabilidades próprias de um ambiente industrial. Justifica-se desta forma o trabalho desenvolvido para adaptar esta técnica às fontes de luz pulsadas. Neste caso os interferómetros de Michelson e de Hung, normalmente utilizados, são substituídos pelo interferómetro de Mach-Zehnder. Este último, permite ajustar independentemente ambas as frentes de onda de forma a obter um padrão de franjas primárias que possa ser utilizado na codificação da fase de cada registo [23]. Nesta montagem é possível ajustar de forma independente o *shear* entre imagens e a frequência portadora. Os padrões de interferência podem ser tratados recorrendo aos algoritmos desenvolvidos para Holografia-TV pulsada que foram descritos anteriormente.

5.3.1 – INTERFERÓMETRO DE MACH-ZEHNDER

O sistema de Mach-Zehnder desenvolvido pelo autor no âmbito desta tese para ser utilizado com lasers pulsados está esquematicamente representado na figura 5.19. Como pode observar-se, neste interferómetro existe uma separação clara entre os dois braços

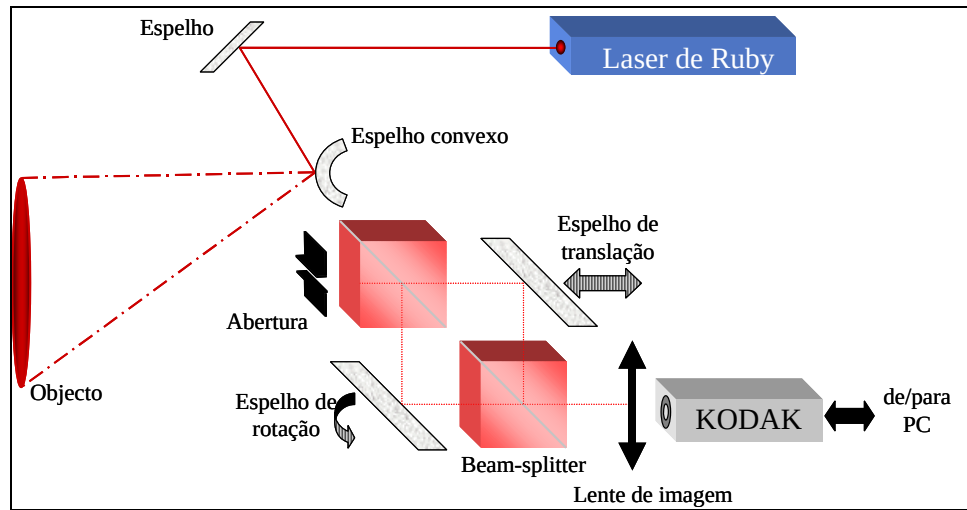


Figura 5.19 – Montagem de um sistema de *shearography* baseado num interferómetro de Mach-Zehnder.

Desta forma é possível a realização do *shear* entre frentes de onda através do deslocamento de um dos espelhos e a introdução de uma portadora por deslocamento do outro. Este facto representa-se na figura 5.20. Considerando frentes de onda não planas a introdução do *shear* entre as imagens e a introdução da frequência portadora podem ser descritas de forma simples recorrendo aos dois esquemas representados. Uma rotação β de um dos espelhos cria duas frentes de onda desfasadas que interferem num plano, uma translação ϵ de um dos espelhos provoca a sobreposição das duas frentes de onda de forma a gerarem um padrão de franjas de interferência.

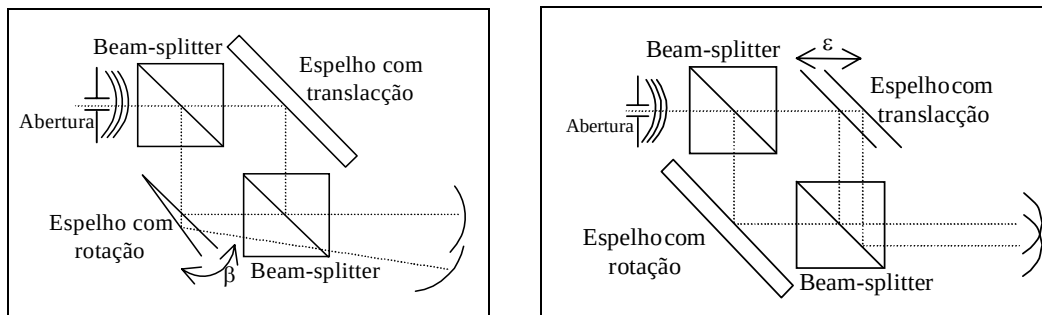


Figura 5.20 – Geração da portadora e do *shear* numa montagem de *shearography* baseada no interferómetro de Mach-Zehnder.

Neste caso é utilizado como abertura uma fenda vertical que se encontra à entrada do sistema interferométrico. Desta forma são obtidos grãos de *speckle* alongados na direcção perpendicular à abertura sem diminuir significativamente a quantidade de luz admitida pelo sistema óptico. O alongamento do *speckle* resulta da necessidade de introduzir uma portadora espacial nos padrões de interferência primários.

Na montagem proposta a lente formadora de imagem encontra-se depois do interferómetro e imediatamente antes do CCD. Nesta configuração foi possível registar vários padrões de interferência com bom contraste e obter os respectivos mapas de fase. No entanto, foram detectadas algumas dificuldades no alinhamento da montagem no que diz respeito ao controlo sobre a portadora. Como se tratava da primeira aplicação conhecida desta técnica à inspecção não destrutiva foram testadas várias configurações para a montagem óptica. A montagem representada na figura 5.21 corresponde aquela que conduziu a melhores resultados e revelou menores dificuldades de ajuste.

No capítulo 7 serão apresentados os resultados obtidos com esta técnica na inspecção de uma placa com estrutura em *sandwich* ensaiada por impacto. Embora a estimulação térmica e a variação de pressão sejam formas correntes de solicição de componentes para revelar defeitos através da *shearography*, neste caso só a excitação dinâmica é adaptada. Fenómenos de baixa velocidade não são compatíveis com os reduzidos tempos entre impulsos fornecidos por lasers pulsados.

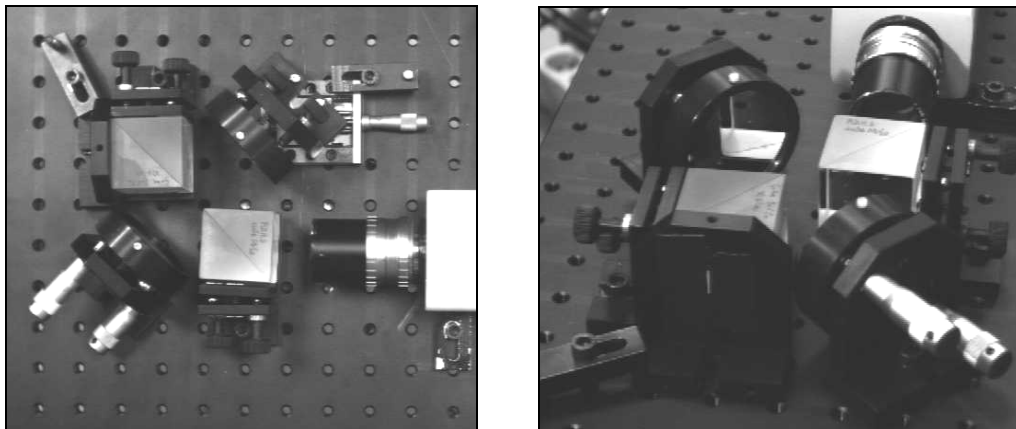


Figura 5.21 – Imagens do interferómetro de Mach-Zehnder construído.

Como neste caso a revelação do defeito está dependente de uma excitação conveniente foi necessário integrar esta montagem num sistema mais amplo incluindo uma sincronização electrónica com excitação dinâmica controlada.

Em conclusão pode dizer-se que existe actualmente um conjunto de técnicas de Interferometria de *Speckle* e de algoritmos com os quais é possível caracterizar fenómenos dinâmicos de elevada velocidade. Estas técnicas estão bem adaptadas a uma aplicação em ambiente industrial onde os lasers pulsados permitem eliminar completamente o efeito resultante das instabilidades.

Referências

- [1] P. Smigielski, "Holographie industrielle", *Ed. Teknea*, 1994.
- [2] H. Steinbichler and S. Leidenbach, "Electronic speckle interferometry with pulsed lasers and practical
- [3] S. Schedin, G. Pedrini, H.J. Tiziani and F.M. Santoyo, "All-fibre pulsed digital Holography", *Optics Communications*, Vol, 165, pag. 183-188, July 1999.
- [4] Creath K., "Holographic interferometry, principles and methods", *Springler series in Optical Sciences*, 1994.
- [5] Crawforth L. et al., "Application of pulsed laser holographic interferometry to the study of magnetic disk drive component motions", in *Proceedings of the 1990 Fall Conference of the SEM*, Bethel, 404-412, 1990.
- [6] Hariharan P. and Ramprasad B., "Wavefront tilter for double-exposure holographic interferometry", *J. Phys. E: Sci. Instrum.* Vol. 6, 173-175, 1973.
- [7] Matthys D. et al., "A windowing technique for the automated analysis of holo-interferograms", *Opt. Laser Eng.*, Vol. 8, 123-136, 1988.
- [8] Pedrini G. et al., "Double pulse-electronic speckle interferometry", *J. Modern Optics*, Vol. 40, 89-96, 1993.
- [9] G. Pedrini, B. Pfister and H.J. Tiziani, "Double-pulsed-electronic speckle interferometry", *Journal of Modern Optics*, Vol. 40, pag. 89-96, 1993.
- [10] Schnars U., "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms", *J. Opt. Soc. America A*, Vol. 11, 2011-2015, 1994.
- [11] Morimoto Y. et al., "Application of Moiré analysis of strain using Fourier transform", *Optical Engineering*, Vol. 27, 650-656, 1988.
- [12] T.Judge et al., "Holographic deformation measurement by Fourier transform technique with automatic phase unwrapping", *Optical Engineering*, vol 31, pag. 533-537, 1992.
- [13] Brite-Euram project, "Pulsed Digital Holography and Shearography, - PDHS", *Report* 1996.
- [14] J. Chousal, "Técnicas de processamento de imagens obtidas por métodos ópticos em análise experimental de tensões", *Tese de doutoramento em Engenharia Mecânica*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
- [15] F. Santos, M. Vaz & J. Chousal, "A dual beam pulsed ESPI system for measurement of out-of-plane displacements", International Conference on Experimental Mechannics, ICEM'98, Oxford, UK, 15-17 April, 1996
- [16] P. Albe & V. Chalvidan, "Extraction par interférométrie holographique des déformées modales présentes dans une plaque en vibration", Colloque SFO, Mittlewhir, França, 10-12 Novembro, 1999.
- [17] F.M. Santoyo, D. Kerr & J. Tyrer, "Interferometric Fringe Analysis Using a Single Phase Step Technique", *Applied Optics*, Vol. 27, pag. 4362-4364, 1988.
- [18] D. Templeton & Y. Hung, "Shearographic fringe carrier method for data reduction computerization", *Optical Engineering*, Vol. 28, pag. 30-34, 1989
- [19] Brite-Euram project, "Pulsed Digital Holography and Shearography, - PDHS", *Report* 1998.
- [20] Brite-Euram project, "Vibration intensity processing by full-field laser multi-pulse technique – VIP", *Report* 2000.
- [21] Dandliker R. and Thalmann R., "Heterodyne and quasi-heterodyne holographic interferometry", *Optical Engineering*, Vol. 24, 824-831, 1985.

- [22] Koechner, "Solid-state laser engineering", (2nd Ed.) *Springler series in Optical Sciences*, 1988.
- [23] G. Pedrini, Y.-L. Zou & H; Tiziani, "Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method", *Pure and Applied Optics*, Vol. 5, pag. 313-321, 1996.

CAPÍTULO 6

APLICAÇÕES À DINÂMICA

6.1 – Introdução	6.2
6.2 – Vibrações harmónicas	6.4
6.2.1 – Técnicas de melhoria do contraste	6.7
6.2.2 – Estudo de um altifalante	6.12
6.2.3 – Testes realizados no grupo PSA	6.18
6.2.4 – Estudo de uma pá de turbina	6.23
6.3 – Medições com excitação por choque	6.39
6.3.1 – Propagação de uma onda de choque numa placa metálica	6.40
Referências	6.52

As aplicações das técnicas de interferometria de speckle descritas nesta tese foram realizadas, entre 1998 e 2000, principalmente no Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) do INEGI. Para além deste trabalho são apresentados resultados obtidos até meados de 2002 de colaborações com outros laboratórios europeus no domínio das técnicas ópticas aplicadas à indústria – HOLO3, PSA e NDT Expert (EADS Airbus). Destas experiências, foi possível efectuar medições com outros equipamentos e observar in-loco as direcções a seguir para que estas técnicas sejam ajustadas às necessidades da indústria. As principais áreas de aplicação destas técnicas são a medição de deslocamentos sem contacto, em situações estáticas e dinâmicas, e o controlo não destrutivo (CND). Este último tema será alvo de uma atenção especial no capítulo 7

A Interferometria de Speckle tem sido um campo de intensas pesquisas durante os últimos 30 anos. Contudo, apesar dos avanços destas técnicas ao nível da electrónica de registo e de tratamento de dados, só na última década ela encontrou o espaço devido nas aplicações industriais. Um factor importante para este atraso é o de que o conhecimento dos métodos ópticos é muitas das vezes reduzido entre os técnicos da indústria.

De qualquer forma na última década o mercado das aplicações industriais cresceu aproximadamente 10 vezes. Para isto se ter tornado realidade vários factores, para além dos tecnológicos, foram fundamentais:

- *Avanços nas técnicas de interpretação das franjas*
- *Aumento da formação sobre as técnicas ópticas na indústria*
- *Validação e certificação das técnicas ópticas.*

6.1 – INTRODUÇÃO

Quando se altera o equilíbrio energético de uma estrutura por aplicação de uma carga ou fazendo variar a temperatura, esta deforma-se no sentido de recuperar a situação de equilíbrio que corresponde à energia mínima para a nova situação.

Considerando apenas os fenómenos resultantes da acção de forças de espectro variável, ou seja, dinâmicos, estes podem ser classificados de acordo com a sua persistência em:

- Estacionários, quando se mantêm ao longo do tempo,
- Não estacionários, todos os outros.

Quanto à forma como varia a energia, os fenómenos não estacionários podem ainda subdividir-se em contínuos e transitórios. Nos primeiros a variação de energia faz-se lentamente até o sistema atingir a sua posição de equilíbrio e nos segundos a variação dá-se subitamente, sendo a recuperação do equilíbrio acompanhada de algumas oscilações onde é dissipada parte da energia envolvida.

Por sua vez os fenómenos estacionários podem ser classificados de acordo com a sua evolução em determinísticos, se é possível prever o seu comportamento futuro, ou aleatórios. Os fenómenos estacionários determinísticos podem ainda ser divididos em periódicos, quando se repetem ao fim de um determinado intervalo de tempo e o seu comportamento é sinusoidal ou pode ser descrito pela soma de vários componentes sinusoidais com diferentes amplitudes e com frequências múltiplas inteiras de um valor fundamental, e quase-periódicos se as várias frequências componentes não se relacionam harmónicamente. A aplicação da óptica a estes tipos de fenómenos permitiu desenvolver várias técnicas que, diferindo entre si no suporte de registo dos padrões de interferência ou na forma como esses padrões são obtidos, se ajustam ao estudo dos vários tipos de fenómenos acima descritos e cuja classificação se representa na figura 6.1.

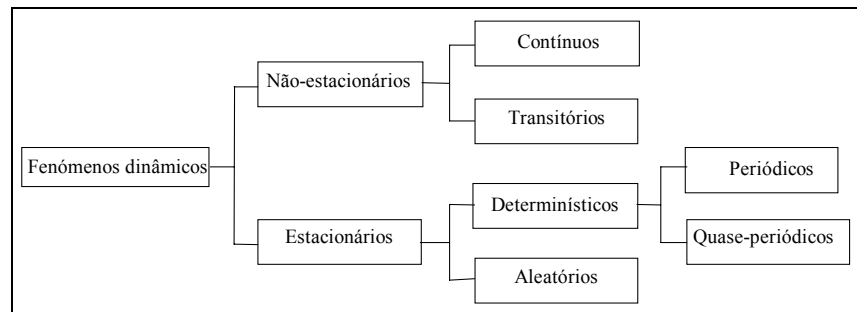


Figura 6.1 – Diagrama representativo dos vários tipos de fenómenos dinâmicos

A capacidade de medição sem contacto e de uma forma global que estas técnicas possuem torna-as particularmente úteis em situações onde existe dificuldade na colocação de transdutores ou que o estudo de um qualquer fenómeno é alterado pela colocação destes.

Com efeito, o estudo do comportamento de materiais e estruturas sujeitas a esforços dinâmicos ou a análise de máquinas em movimento (motor automóvel, por exemplo) faz-se habitualmente através de detectores de medição discreta com contacto (acelerómetros, extensómetros, ...).

A figura 6.2 mostra um campo de deslocamentos obtidos por Holografia-TV em *time-average* de uma pá de turbina a vibrar sinusoidalmente num modo próprio. É visível que a colocação de uma massa mesmo de pequeno valor (2 gr) influencia de forma decisiva a vibração natural da estrutura.

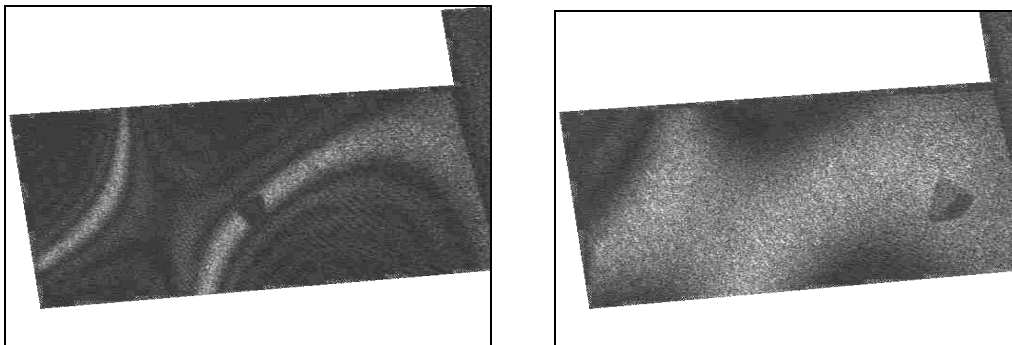


Figura 6.2 – Simulação do efeito da colocação de um acelerómetro numa estrutura em vibração.

Pode assim verificar-se o que aconteceria se colocássemos um número importante de acelerómetros numa estrutura com o objectivo de determinar o campo de deslocamentos. Pois em muitas situações é necessário utilizar um grande número de detectores para a completa definição do comportamento dinâmico do componente.

Mesmo no caso em que os detectores influenciam pouco a resposta mecânica da estrutura eles comportam ainda algumas desvantagens:

- Elevado tempo de instalação do sistema estrutura/detectores. É necessário por vezes perder alguns dias para garantir a correcta colocação.
- Um grande número de detectores implica quase sempre um poderoso sistema de recolha e processamento de sinal o qual pode, por vezes, ter um custo superior ao de um sistema de Holografia-TV.

A utilização de detectores ópticos pontuais sem contacto é já um progresso na facilidade de medição embora extremamente oneroso quando vários canais de medida são necessários. Assim, estes sistemas são geralmente associados a sistemas de varrimento, o que restringe o seu domínio de aplicações e aumenta o tempo envolvido em cada medição.

Os métodos ópticos globais, de *speckle* ou holográficos, possuem elevada resolução ($0.01\ \mu\text{m}$ a $0.1\ \mu\text{m}$) e estão melhor adaptados ao estudo de deslocamentos dinâmicos. Frequentemente são associados a métodos pontuais (vibrómetros *laser*, por exemplo) complementares, para permitir uma correcta sincronização dos parâmetros temporais do sistema (impulsos *laser*/aquisição CCD/máximo deslocamento).

6.2 – VIBRAÇÕES HARMÓNICAS

A análise dinâmica de estruturas tem como finalidade conhecer o seu comportamento quando solicitadas por fenómenos variáveis no tempo. Esta análise pode ser feita em condições periódicas da causa perturbadora, ou em situações em que esta é transitória. Neste último caso, quando a excitação é impulsional, o conhecimento das frequências e os respectivos modos próprios da estrutura permitem descrever o seu comportamento em qualquer instante desde que convenientemente sobrepostos. Esta técnica é designada por sobreposição modal e consiste em admitir que a configuração de uma estrutura em qualquer instante resulta da sobreposição dos seus modos de vibração multiplicados por pesos apropriados, tal como num desenvolvimento em série de modos próprios:

$$\tilde{U} = \sum_{i=1}^{n_{\text{modos}}} a_i \tilde{U}_i \cos(\omega_i t) \quad (6.1)$$

onde $U_{(t)}$ corresponde à configuração da estrutura no instante t e resulta da sobreposição de cada vector próprio da estrutura U_i à respectiva frequência ω_i . A intensidade de cada vector é condicionada por um factor de escala a_i que corresponde à amplitude de vibração de cada modo próprio.

Por sua vez, a configuração temporal da força excitadora é aproximada com um desenvolvimento em série trigonométrica envolvendo frequências iguais às frequências próprias da estrutura. Por aqui se constata que a análise modal pode constituir uma ferramenta atractiva e económica para o estudo do comportamento de uma estrutura em regime dinâmico, quando a perturbação é de baixa frequência.

Sempre que a excitação da estrutura é periódica é de esperar, da parte desta, um comportamento periódico correspondente. Variando a frequência de excitação é possível identificar todos os modos naturais de vibração pelo aumento da amplitude do movimento obtida sempre que é alcançada uma frequência de ressonância.

A medição de vibrações, por serem fontes de ruído ou causas de avaria, adquiriu um papel importante em todos os domínios da mecânica. O desenvolvimento das técnicas de interferometria holográfica e a sua contribuição na área da mecânica experimental iniciou-se com aplicações das técnicas de *time-average* na determinação dos modos naturais de vibração. Também os primeiros sistemas de Holografia-TV, devido às dificuldades existentes na subtracção de imagens vídeo foram aplicados neste tipo de estudos.

Powel e Stetson demonstraram que a interferometria holográfica pode ser extremamente útil na determinação dos modos naturais de vibração de uma estrutura [1]. Neste caso, a luz difundida por cada ponto do objecto que vibra está modulada em fase com uma profundidade de modulação proporcional à amplitude de vibração do ponto. Esta modulação temporal que o processo holográfico detecta é revelada através de um conjunto de franjas no processo de reconstrução. As franjas são locais de igual valor de modulação e por isso são também uma medida da amplitude de vibração.

O deslocamento em cada ponto de um objecto a vibrar sinusoidalmente em torno da sua posição de equilíbrio é dado por:

$$z(x, t) = Z(x) \sin \omega t \quad (6.2)$$

Nesta equação $Z(x)$ é a amplitude da vibração mecânica no ponto x , e ω é a frequência angular da vibração. A frente de onda emitida pelo objecto num estado estacionário, representada pela sua amplitude complexa, é descrita por:

$$U_0(x, y) = a(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \quad (6.3)$$

A diferença de fase imposta ao feixe objecto é dada pelo produto entre o vector de onda k e o caminho óptico imposto pela vibração que é $2 Z(x) \sin \omega t$, ou seja:

$$\Delta\phi(x, y, t) = k \cdot 2 Z(x) \sin \omega t \quad (6.4)$$

Assim, a amplitude complexa da luz no plano do detector é dada por:

$$U_0(x, y, t) = a(x, y) \exp \left\{ i \left[\phi(x, y) + \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) Z(x) \sin \omega t \right] \right\} \quad (6.5)$$

A medição em *time-average* consiste em registar o padrão de interferência de um objecto enquanto este se encontra a vibrar numa das suas frequências naturais (f) durante um período de tempo $\Delta T \gg 1/f$. Desta forma a amplitude complexa é proporcional a $U_0(x, y, t)$ e, integrado no tempo de exposição ΔT tem-se:

$$\frac{1}{T} \int_0^{\Delta T} a(x, y) \exp \left\{ i \left[\phi(x, y) + \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) Z(x) \sin \omega t \right] \right\} dt = U_{os}(x, y) \frac{1}{T} \int_0^{\Delta T} \exp \left\{ i \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) Z(x) \sin \omega t \right\} dt \quad (6.6)$$

que tem como transformada de Fourier:

$$u_0(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(M_0) \exp(i n \phi_0) \delta(f - nF) \quad (6.7)$$

Nestas equações $\omega = 2\pi f$ e $J_n(M_0)$ é a função de Bessel de ordem n de primeira espécie com o argumento M_0 . O aparecimento das funções de Bessel deve-se ao facto dos registos obtidos com Holografia-TV, em *time-average*, resultarem de uma integração temporal. O tempo de exposição, ΔT (40 ms/25 Hz) de um registo electrónico é superior ao período de vibração do objecto pelo que traduz o resultado da integração dos padrões de interferência correspondentes às várias posições ocupadas pelo objecto durante o seu movimento. Quando o período da vibração é muito inferior ao tempo de integração a intensidade das franjas representada pela equação 6.8 é a modulada pela função de Bessel J_0 .

$$|E_{r0}|^2 = J_0^2 \left(\frac{4\pi a_0}{\lambda} \right) \quad (6.8)$$

Resultando estes registos em *time-average* de uma integração temporal não possuem qualquer informação sobre a fase do movimento. Estão, por isso, limitados na sua utilidade devido às características das franjas obtidas.

Existe no entanto uma possibilidade de aceder à fase do movimento de vibração que foi proposta por Aleksoff e consiste na modulação em fase do feixe de referência [2]. Nesta montagem utilizando um transdutor piezoeléctrico, o feixe de referência é modulado sinusoidalmente em fase com a mesma frequência do objecto. Esta modulação temporal permite que o padrão de franjas secundárias seja alterado de acordo com as diferenças de fase e amplitude entre ambos os braços do interferómetro. Esta técnica permite então, na forma mais simples de modulação sinusoidal de fase, determinar com relativa precisão a fase de movimentos sinusoidais estudados com técnicas de *time-average* [3].

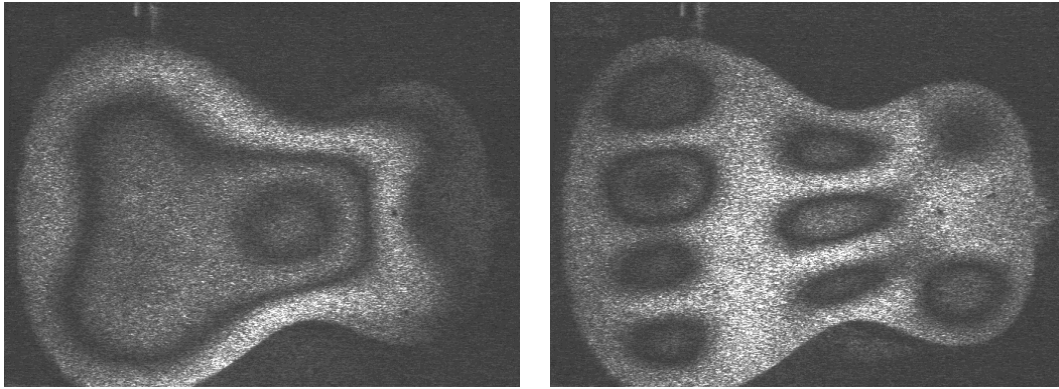


Figura 6.3 – Padrões interferométricos de um cavaquinho a vibrar em dois modos próprios, obtido em *time-average* (136 Hz e 2447 Hz).

As técnicas de *time-average* são, contudo, de grande utilidade na caracterização expedita das formas modais de estruturas. Admitem também os dois tipos de correlação anteriormente descritos, por adição e por subtracção. Na primeira forma é necessário recorrer a técnicas de filtragem electrónica para remover os termos de autocorrelação e otimizar assim o contraste. Na correlação por subtracção, a mais utilizada após a divulgação das placas de processamento de imagem, existem alguns algoritmos numéricos para otimizar o contraste. O parágrafo seguinte descreve dois desses algoritmos utilizados neste trabalho.

6.2.1 – TÉCNICAS DE MELHORIA DE CONTRASTE

Os padrões holográficos de franjas secundárias obtidos por *time-average* embora apresentem uma modulação de amplitude característica, têm um contraste semelhante aos padrões obtidos por dupla-exposição. O facto de não existir sistema formador de imagem, permite que o *speckle* não seja normalmente visível, para além disso, a possibilidade de separar espacialmente os termos de intercorrelação permite obter imagens de elevado contraste.

Apesar de apresentarem registos de contraste inferior as técnicas electrónicas de gravação de padrões de *speckle* apresentam vantagens suficientes para justificarem a sua utilização. Estas técnicas para além do ruído aditivo introduzido pelos circuitos electrónicos de aquisição e processamento de sinal, apresentam também ruído multiplicativo sob a forma de *speckle*. Este tipo de ruído é introduzido pela própria portadora de informação do sistema. Sobreposto às suaves variações de intensidade do padrão de franjas secundárias aparece um padrão de *speckle* que resulta das variações aleatórias de fase, e cujo contraste pode ser calculado pela equação 6.9:

$$C_s = \frac{\sigma_B}{\langle B \rangle} \quad (6.9)$$

onde C_s é o contraste do *speckle*, σ_B refere-se ao desvio padrão do brilho do monitor, cujo valor médio é representado por $\langle B \rangle$, ver figura 6.4.

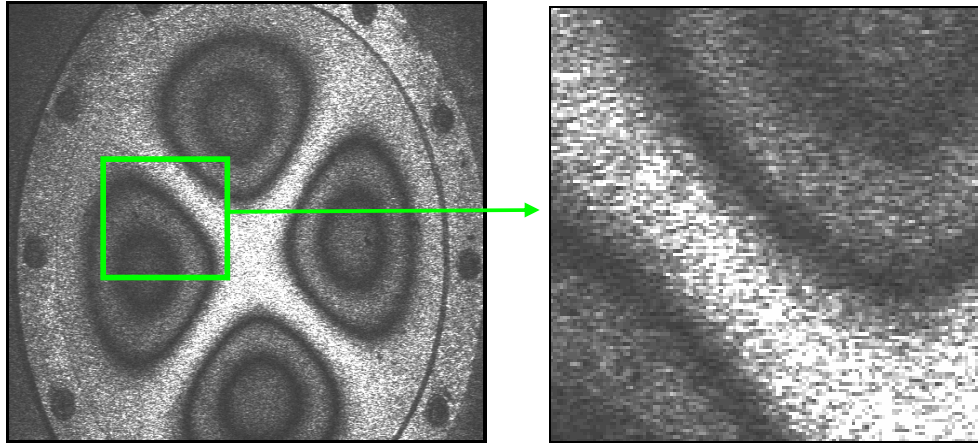


Figura 6.4 – Padrão de franjas secundário e observação do ruído de *speckle* de alta-frequência.

Idealmente C_s deveria ser nulo, correspondendo a um padrão de franjas isento de *speckle*. Na prática, obtém-se um valor de $\sqrt{2}$ para o contraste do *speckle* de um interferómetro em que um dos feixes é uniforme e obtém-se $(2 + 3\tau)^{1/2}$ para um interferómetro em que ambos os feixes são padrões de *speckle* [4]. O parâmetro τ que figura na segunda expressão varia entre 0 e 1, diminuindo com o aumento da abertura do sistema óptico, e representa o quociente entre a resolução do sistema óptico e a resolução do CCD [5]. O contraste obtido em interferómetros com referência de *speckle* é ligeiramente superior, dado que ambos os padrões contribuem para as variações verificadas no termo de intercorrelação.

A adição de várias imagens com a mesma função de franja e padrões de *speckle* não correlacionados permite, após determinar o valor médio da intensidade para cada *pixel*, obter uma redução no contraste do ruído. Se forem envolvidas N imagens obter-se-á uma redução de contraste de ruído dada por:

$$C_{red} = \frac{C_s}{\sqrt{N}} \quad (6.10)$$

Esta técnica é designada por **Speckle Noise Reduction**. Para que haja descorrelação nos padrões de *speckle* é necessário que o ângulo de iluminação seja alterado de forma a admitir novos *speckles* na abertura do sistema óptico [6]. O mesmo efeito pode ser obtido deslocando a abertura do sistema óptico formador de imagem no seu plano [5]. Se o objecto for iluminado com o padrão de *speckle* resultante do espalhamento da luz por um difusor, a descorrelação é facilmente obtida deslocando o difusor (vidro despolido). Foi esta a técnica utilizada no registo dos padrões de *speckle* em *time-average* apresentados neste parágrafo.

O contraste do padrão das franjas secundárias cresce proporcionalmente ao número de imagens envolvidas até se ter atingido um determinado valor limite, após o qual apenas o ruído de *speckle* é alterado, aumentando contudo o ruído electrónico. A utilização de 8 imagens possuindo a mesma função de franja,

mas provenientes de padrões de *speckle* não correlacionados, permite obter padrões com um bom contraste, como se pode observar na figura 6.5.

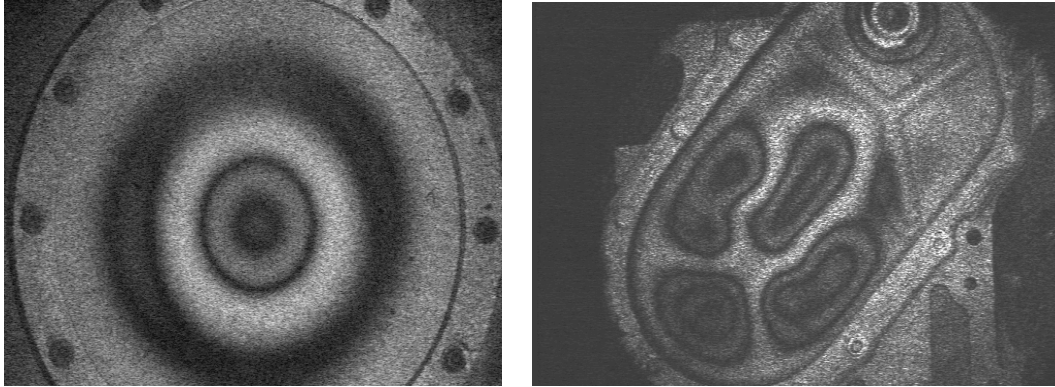


Figura 6.5 – Registos interferométricos de uma placa circular e de uma tampa de motor a vibrarem num modo natural obtidos em *time-average* com *speckle noise reduction* [doc. LOME]

Outra forma de aumentar o contraste das franjas provenientes de registos em *time-average* é obtida quando se utilizam sistemas de processamento digital com capacidade de armazenamento de várias imagens. Estes sistemas permitem utilizar técnicas de varrimento de fase com tratamento de informação *pixel a pixel*. O varrimento máximo/mínimo (**maxmin**) consiste em fazer variar a fase entre o feixe de referência e o feixe objecto para que a amplitude em cada ponto percorra toda a modulação do sinal [7].

A utilização de um cristal piezo-eléctrico para deslocar um dos espelhos do braço de referência do interferómetro permite variar a fase entre os dois feixes. Com o objecto a vibrar, e medindo a intensidade num pixel com modulação, calibra-se o sistema deslocando o espelho e detectando o deslocamento correspondente a uma variação de fase de 2π . O varrimento **maxmin** corresponde a variar a fase em n incrementos para que a sua soma perfaça 2π , registando as imagens obtidas para cada incremento. A análise da intensidade de cada *pixel* nas várias imagens permite detectar os que não têm modulação e, para cada um daqueles em que a intensidade é diferente de zero, determinar quais são os valores máximos e mínimo de intensidade. O padrão de franjas secundário é obtido substituindo a intensidade de cada *pixel* com modulação pela diferença entre os valores máximo e mínimo de intensidade determinados pelo varrimento. Nos pontos sem modulação a sua intensidade é obtida interpolando entre a intensidade dos pontos com modulação mais próximos, ver figura 6.6. Obtêm-se assim uma imagem com um perfil de intensidade dado pela equação 6.11:

$$I(x,y) = I_a(x,y) \times J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} a_0(x,y) \right] \quad (6.11)$$

Neste caso, o padrão de intensidade é modulado por uma função $|J_0|$, em vez de J_0^2 pelo que a sua envolvente diminui mais lentamente. Assim, a visibilidade dos padrões de franjas secundárias aumenta, aumentando também o número de franjas identificáveis.

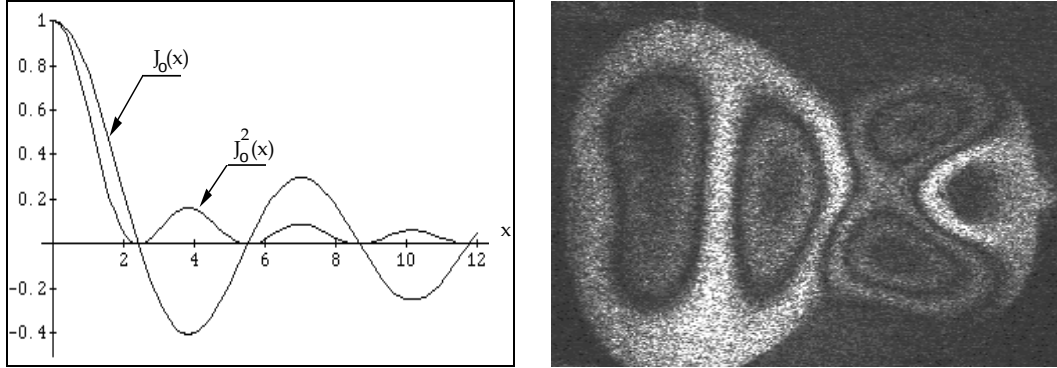


Figura 6.6 – Modulação do padrão de franjas pela função $|J_0|$ e exemplo sobre cavaquinho a vibrar num modo próprio (1546 Hz) por técnica de *maxmin*.

Estas técnicas para melhorar o contraste dos padrões de franjas secundárias obtidos com a Holografia-TV, não podem ser utilizadas em tempo real. A aquisição de várias imagens, bem como o controlo de fase entre elas ou a descorrelação do padrão de *speckle*; tornam o processo moroso quando comparado com os 40 ms da amostragem vídeo. Formas mais complexas de melhoria destes padrões de franjas são descritas por Vaz [8].

As técnicas convencionais de *time-average* estando limitadas na sua utilidade devido às características das franjas obtidas podem, contudo, ser adaptadas com vantagens através de técnicas como a holografia estroboscópica ou holografia com modulação de fase sinusoidal da referência [3]. Para isso deve ser possível a modulação temporal da onda objecto ou de referência em conjunto com a modulação própria imposta pelo objecto [9].

A holografia estroboscópica em que se utiliza a modulação da intensidade da fonte de luz é uma técnica de modulação de amplitude que pode ser utilizada para estudar fenómenos dinâmicos, quer em holografia, quer em Holografia-TV. Esta técnica pode ser implementada com *lasers* contínuos (por obturação do feixe) ou, mais naturalmente, através de *lasers* de impulso. A redução dos tempos de iluminação evita que a modulação de fase provocada pelo movimento do objecto contribua para o padrão de interferência, obtendo-se registos onde a intensidade varia linearmente com a fase. Para um *laser* de impulsos, a equação que descreve o padrão de franjas é:

$$|E_{r0}|^2 = \left| \cos \left(\left(\frac{4\pi a_0}{\lambda} \right) \sin \phi_0 \right) \right|^2 = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(2 \left(\frac{4\pi a_0}{\lambda} \right) \sin \phi_0 \right) \right] \quad (6.12)$$

Obtém-se assim, um padrão de franjas sinusoidais com uma frequência espacial determinada pela diferença de fase ϕ_0 . A aplicação da modulação de amplitude nesta situação tem como vantagem principal a obtenção de padrões de interferência cuja intensidade é descrita por uma função cosseno. As imagens que se apresentam em seguida, figura 6.7, pretendem mostrar a diferença entre os padrões de intensidade obtidos por técnicas de *time-average* clássicas e os obtidos por iluminação estroboscópica.

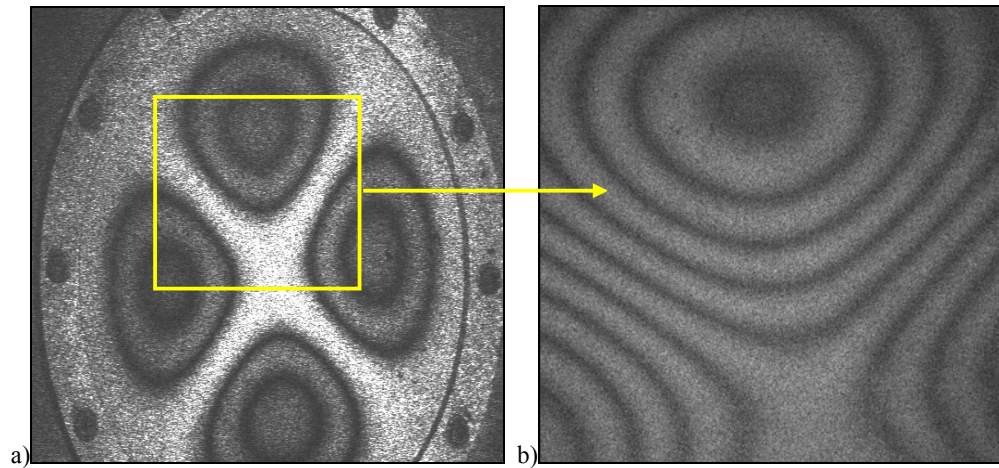


Figura 6.7 – a) Registo em *time-average* (760 Hz). b) Registo por modulação de amplitude (760 Hz).

A imagem 6.7 a) foi obtida através de um *laser* de Argon de emissão contínua COEHERENT INNOVA 90, por técnicas de *time-average* com *Speckle Noise Reduction*. A dependência de J_0 no padrão interferométrico é visível pela existência de uma franja mais brilhante do que as outras. A figura 6.7 b) apresenta um registo interferométrico obtido através do duplo impulso de um *laser* de Nd:YAG CONTINUUM NY-80.

De notar ainda que o ruído de *speckle* presente na figura 6.7 b) é reduzido, apesar de não se terem utilizado técnicas de redução do contraste de ruído. Este facto resulta da utilização de uma câmara CCD Kodak Megaplug 1.0E de alta-resolução (1024x1024 *pixels*).

Esta técnica de registo pode ser considerada estroboscópica pois apenas dois impulsos, de duração aproximada de 10 ns, foram utilizados. Com esta técnica de duplo-impulso as franjas apresentam todas a mesma intensidade pelo que o padrão interferométrico é sinusoidal. Este pode, por isso, ser tratado através dos métodos conhecidos de cálculo de fase, *phase-step* ou FFT. Se bem que o primeiro não seja adaptável a esta técnica, devido aos tempos envolvidos na operação de *phase-shift* e por envolver pelo menos 3 padrões de intensidade, o cálculo da fase por rotinas baseadas na FFT revelou-se de extrema simplicidade e com desempenhos excelentes. O registo de 2 padrões interferométricos sinusoidais permite, então, o cálculo de fase tornando possível quantificar a amplitude de vibração dos objectos em estudo.

Como foi referido anteriormente, se apenas tivermos acesso ao registo de 1 ou 2 padrões interferométricos as técnicas baseadas no cálculo de FFT podem ser utilizadas para o cálculo de fase da estrutura em vibração. Há, no entanto, necessidade de introduzir uma frequência portadora espacial no padrão de *speckle*, primário ou secundário, para que a modulação registada devido ao deslocamento do objecto possa ser determinada.

Em seguida apresentam-se 3 exemplos de aplicação das técnicas de modulação de amplitude da iluminação por duplo-impulso (ou holografia estroboscópica). Trata-se da determinação dos modos naturais de vibração de um altifalante Audax, de componentes do motor de um automóvel Peugeot e de uma pá de turbina de um motor de reacção. A introdução da frequência portadora espacial para o subsequente tratamento por FFT dos registos obtidos, é conseguida através da inclinação da fibra que conduz o feixe de referência.

6.2.2 – ESTUDO DE UM ALTIFALANTE

O altifalante estudado com as técnicas duplo-impulso desenvolvidas no âmbito desta tese pode ser considerado como uma membrana cónica em que a parte central é uma calote esférica de 80 mm de diâmetro. Neste altifalante, do fabricante francês Audax, estas duas partes estão ligadas por um anel de rigidez superior. Na figura 6.8 pode observar-se o objecto a estudar e o sistema de registo dos padrões de *speckle*. O altifalante encontrava-se, neste estudo, colocado na vertical e fixo num suporte especialmente realizado para o encastrar em todo o seu perímetro.

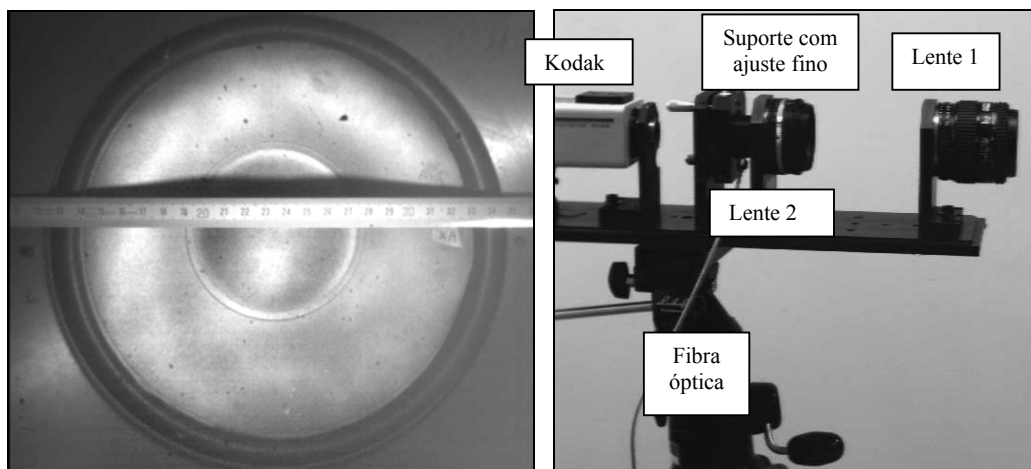


Figura 6.8 – Altifalante Audax e sistema de registo dos padrões de *speckle*.

O sistema interferométrico utilizado para a realização da dupla exposição consistiu numa montagem de Holografia-TV com sensibilidade na direcção normal ao plano. Desta forma a determinação das amplitudes de vibração para diferentes modos naturais de vibração do altifalante é possível. A fonte de luz utilizada foi um *laser* de rubi LUMONICS modelo HLS2 capaz de fornecer 1J/impulso. Este *laser*, descrito no capítulo 3, funciona normalmente em impulso único. No entanto, através do ajuste do tempo de abertura da célula de Pockels o duplo-impulso pode ser realizado. Este ajuste temporal tem de ser feito num intervalo de tempo entre 1 μ s e 800 μ s.

O sistema interferométrico integrou uma câmara CCD Kodak MegaPlus 1.0 como meio de registo dos padrões de *speckle*. Esta é uma câmara digital com uma resolução de 1024 x 1024 *pixels* e com a

possibilidade de fazer a dupla-aquisição assíncrona. Este modo de funcionamento permite registar duas imagens separadas por um tempo de *transfer-gate* de apenas 3 μs . A sequência de aquisição e os registos são controlados através de uma placa de imagem Matrox Pulsar.

A luz emitida pelo *laser* de rubi é dividida em dois para gerar os dois braços do interferómetro. O feixe objecto é dirigido para iluminar o altifalante através de um espelho côncavo e o feixe de referência, menos intenso, é injectado numa fibra óptica.

Após a reflexão no altifalante, o feixe objecto é feito incidir no alvo CCD através de duas lentes Nikon. A primeira permite ajustar a abertura para recolher a quantidade de luz desejada e a segunda permite ajustar uma outra abertura para criar um *speckle* de grandes dimensões onde possa existir a frequência portadora.

O feixe de referência foi dirigido para o CCD através de uma fibra óptica monomodo. Esta fibra estava solidária com um suporte X-Y- Φ que permitia posicioná-la em relação ao eixo óptico do sistema. Foi assim possível introduzir a portadora espacial.

Atenção especial no cálculo dos comprimentos de cada braço do interferómetro deve ser tida em conta pelo facto de se utilizarem fibras ópticas. O facto de estas terem um índice de refração próximo de 1.5 impõe que o braço de referência tenha um comprimento menor que o braço objecto para que o contraste das franjas seja máximo (máxima coerência).

Para além destes componentes utilizou-se ainda um sistema de sincronização temporal (SST) da firma Steinbichler para controlar os disparos *laser* e o *trigger* da câmara CCD. A verificação dos tempos foi feita através de um osciloscópio digital. A figura 6.9 apresenta esquematicamente o sistema interferométrico.

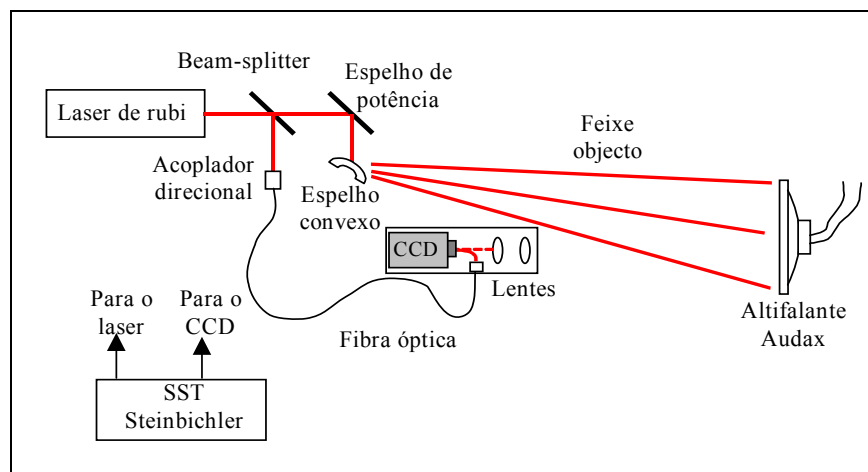


Figura 6.9 – Diagrama esquemático do interferómetro utilizado na dupla-exposição.

Todo este sistema óptico pode ser considerado como sendo controlado pelo SST. Na verdade este sistema, tal como os sistemas desenvolvidos no LOME, e descritos no capítulo 3, é uma parte fulcral para que as técnicas de registo de padrões de *speckle* por duplo-impulso forneçam resultados interpretáveis e repetitivos. Este sistema de sincronização permite gerar atrasos entre 1 μs e 999 999 μs com 1 μs de resolução.

Uma vez que a estrutura está em vibração livre não existe nenhum sinal do sistema que seja utilizado para sincronizar as aquisições. Assim, o sinal de *start* é gerado pelo operador através do SST. A partir deste instante são gerados dois sinais de atraso $dt1$ e $dt2$ para o *laser* e para a placa de processamento de imagem, como se descreve no esquema da figura 6.10.

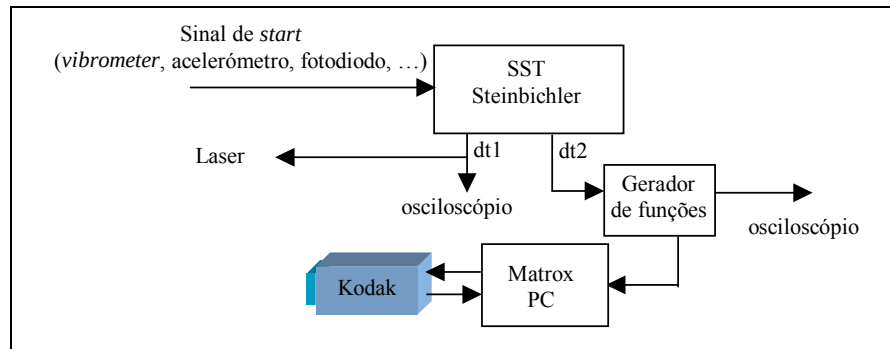


Figura 6.10 – Diagrama de envio de sinais de controlo

Na determinação dos atrasos temporais entre o *laser* e a câmara deve ser tido em conta que o *laser* demora tempos variáveis, conforme o tempo entre o duplo-impulso, para fazer a carga dos condensadores. Este atraso existe sempre. Por exemplo, para um ΔT de $10\ \mu\text{s}$, o tempo de bombagem é de $1150\ \mu\text{s}$.

Para se fazer a sincronização entre o *laser* e a câmara parte-se do princípio que existe um atraso nulo no *laser*, ou seja $dt1 = 0\ \mu\text{s}$; e impõe-se um atraso na câmara, $dt2$, de forma a completar o atraso natural de $1150\ \mu\text{s}$ (para o caso de se utilizar um $\Delta T = 10\ \mu\text{s}$). A soma $dt2 + 37 + 255$ deve ser igual a 1150 . Determina-se então um atraso $dt2$ de $860\ \mu\text{s}$.

O valor de $37\ \mu\text{s}$ é o tempo de reacção da câmara e $255\ \mu\text{s}$ é o tempo de abertura na primeira exposição. Para que o impulso *laser* caia no fim da primeira aquisição o atraso terá de ser 1 a $2\ \mu\text{s}$ menor. Assim, garante-se que o 1º impulso está na 1º quadro e o segundo impulso no segundo quadro. Na figura 6.11 representa-se o diagrama temporal de atrasos entre os impulsos *laser* e as aquisições CCD para um tempo entre duplo-impulso de $10\ \mu\text{s}$.

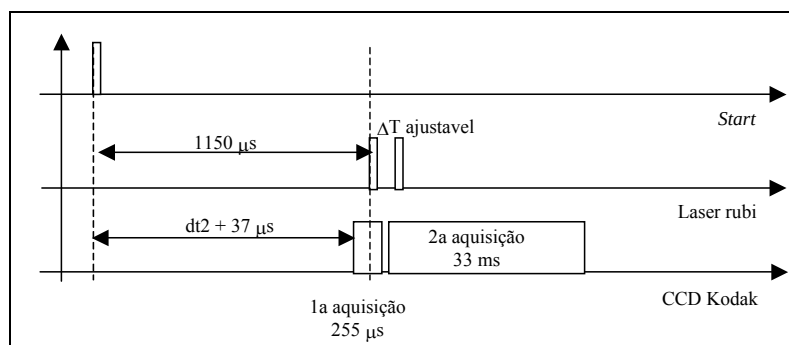


Figura 6.11 – Diagrama temporal dos atrasos gerados pelo sistema de *trigger*.

A aquisição dos registos de *speckle* permite enviar para a placa de processamento de imagem dois padrões de franjas primárias com uma frequência portadora espacial no *speckle*. Os dois registos obtidos são posteriormente processados através de FFT para gerar dois padrões de *speckle* em que a fase está calculada. Na figura 6.12 representa-se o diagrama de cálculo dos padrões de fase secundários.

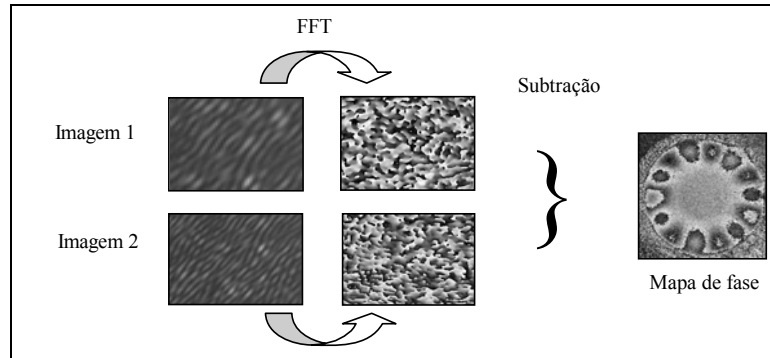


Figura 6.12 – Obtenção de um mapa de fase através de algoritmos de FFT.

A determinação do filtro de Fourier a utilizar é determinado pela quantidade de franjas portadoras inscritas nos grãos de *speckle* primário. A subtração destes dois registos de fase primários fornece a cartografia de fase secundária da estrutura.

Apresentam-se em seguida os resultados obtidos na determinação de frequências naturais do altifalante Audax e as suas formas modais. Através destes resultados pode verificar-se as vantagens de utilizar um sistema interferométrico que permite o cálculo da fase, a sua desmodulação e por conseguinte a determinação das amplitudes de vibração do cone do altifalante. Este último parâmetro necessita do conhecimento da interfranja. A interfranja, i , é a distância, na direcção fora-do-plano, entre duas franjas consecutivas (2π) e depende do comprimento de onda da luz incidente, λ , e do ângulo θ entre a observação e a iluminação. É este parâmetro que permite passar de uma cartografia de fase para uma cartografia de deslocamentos, ou amplitudes de vibração. A equação 6.13 permite determinar a interfranja:

$$i = \frac{\lambda}{2 \cos \theta} \quad (6.13)$$

O primeiro resultado apresentado refere-se a uma forma modal obtida para uma frequência de vibração de 1000 Hz. Dois resultados são apresentados na figura 6.13, um em que a amplitude de vibração é imposta com uma diferença de potencial (ddp) de 4V pico-a-pico (pp) e outra, com uma amplitude de vibração imposta por uma ddp de 8 Vpp. Pode verificar-se que efectivamente a situação em que a amplitude de vibração é maior é aquela que é criada com uma ddp superior. As duas primeiras imagens apresentam os mapas de fase relativos às duas situações. No primeiro caso (4V) a amplitude de vibração não é suficiente para gerar sequer um deslocamento fora do plano de uma franja. No segundo caso a ddp é capaz de criar deslocamentos mais importantes, que são revelados pela quantidade de franjas obtidas nos mapas de fase.

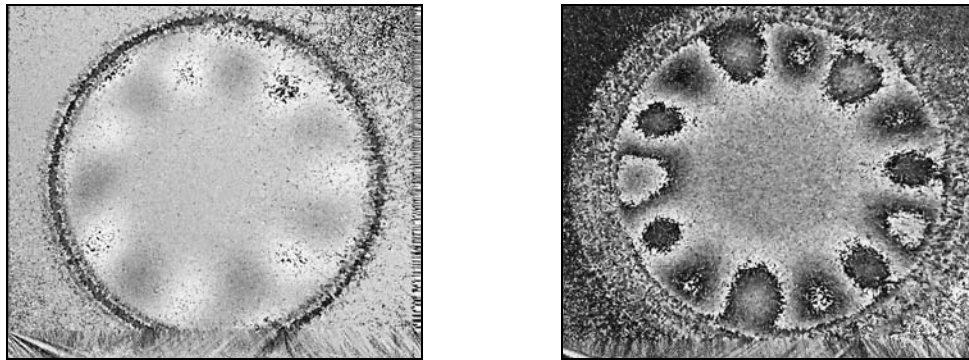


Figura 6.13 – Observação da forma modal de 1000 Hz através de mapas de fase.

Após a desmodulação dos mapas de fase, figura 6.14, pode confirmar-se que a amplitude de vibração para o caso de 8 Vpp é superior à do caso em que a ddp é de apenas 4 Vpp. Nesta fase, o campo de deslocamentos é rigorosamente quantificado. No primeiro caso atinge-se um deslocamento fora do plano de cerca de 0.14 μm em relação a um ponto de deslocamento relativo nulo e no segundo caso a amplitude máxima de vibração é da ordem dos 0.64 μm .

Os resultados apresentados em pseudo-cores permitem verificar com mais rigor, em relação às cartografias a níveis de cinzento, as zonas de vibração não homogêneas. Sendo este um altifalante de graves verifica-se que ele não vibra como um todo, como pistão. As zonas de diferente amplitude de vibração permitem confirmar que se está na presença de um modo próprio de vibração.

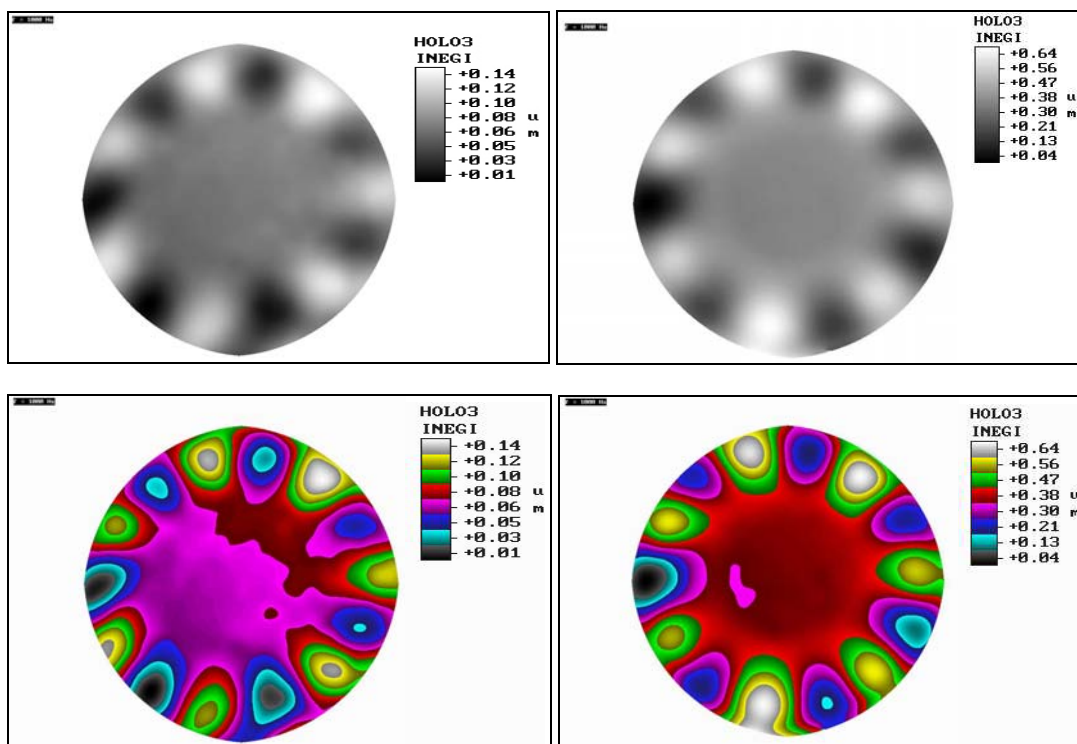


Figura 6.14 - Altifalante AUDAX a vibrar a 1000 Hz. Imagem desmodulada.

As figuras seguintes, figuras 6.15 e 6.16, apresentam resultados obtidos para outros modos naturais de vibração do altifalante. Esses modos de vibração são obtidos para frequências de 320 Hz e 538 Hz. As frequências de vibração foram geradas com um sinal de amplitude 8 V pp. Pode verificar-se que estas frequências de vibração inferiores não evidenciam da mesma forma a falta de homogeneidade na vibração do corpo central do altifalante, como no caso de 1000 Hz.

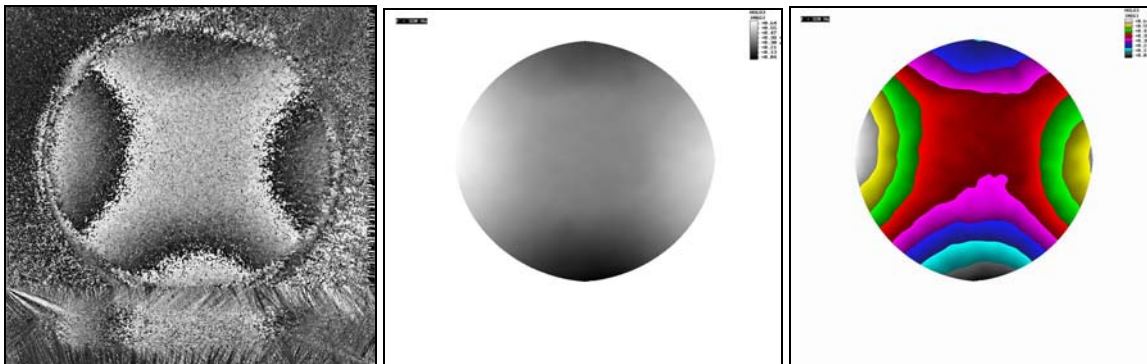


Figura 6.15 - Altifalante AUDAX a vibrar a 320 Hz. Mapa de fase e imagens desmoduladas.

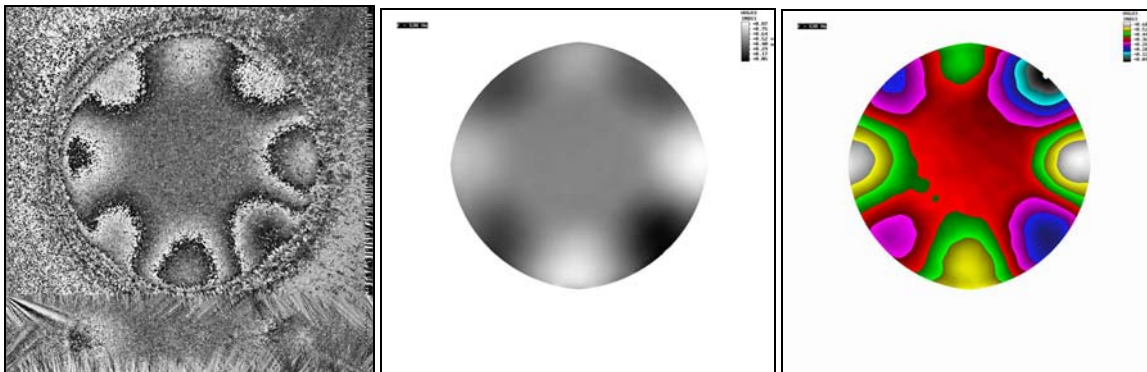


Figura 6.16 - Altifalante AUDAX a vibrar a 538 Hz. Mapa de fase e imagens desmoduladas.

De forma a dar uma perspectiva realista da vibração do altifalante num certo instante, os mapas de fase permitem, através de rotinas adequadas de processamento de imagem, apresentar os resultados de formas variadas. Para além das pseudo-cores ou da desmodulação a níveis de cinzento é possível também fazer a sobreposição dos resultados da medida sobre uma imagem do objecto e obter perspectivas 3D do campo de deslocamentos. Estes dois casos são apresentados na figura 6.17 para uma frequência de vibração de 1 KHz. Estas ferramentas numéricas são de grande utilidade na análise do comportamento dinâmico de estruturas. A primeira permite facilmente relacionar o campo de deslocamentos verificado entre os dois impulsos com a geometria do objecto. Desta forma, defeitos na estrutura ou singularidades geométricas com influência no seu comportamento dinâmico serão facilmente localizadas. A segunda permite uma melhor compreensão do comportamento global da estrutura.

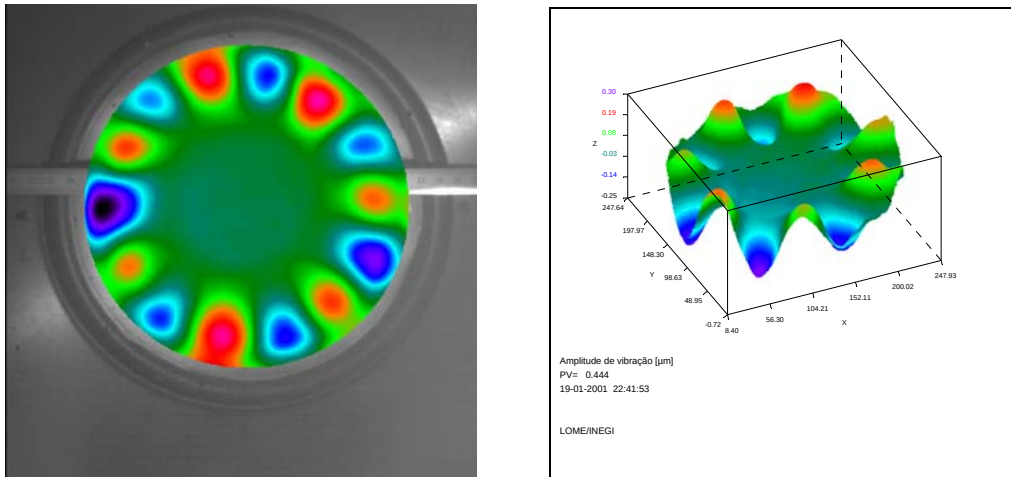


Figura 6.17 – Diferentes formas de apresentar os resultados das medições. Por sobreposição com uma imagem do objecto e através de uma perspectiva 3D.

Acresce ainda que a informação presente nestes resultados se reveste de grande interesse pois pode ser utilizada no cálculo de grandezas de grande utilidade em Engenharia. Utilizando vários resultados, obtidos em diferentes instantes da excitação, é possível recorrer a rotinas de cálculo de Intensidade Estrutural ou ainda obter a completa caracterização do comportamento dinâmico da estrutura, isto é, a amplitude e fase da vibração em relação a iguais características da excitação [10,11,12].

6.2.3 – TESTES REALIZADOS NO GRUPO PSA

De forma a validar o equipamento de Holografia-TV com introdução de uma frequência portadora espacial nas franjas primárias em ambiente industrial e em condições reais, testes em componentes de um automóvel foram realizados nas instalações da PSA em Belchamp (França), primeiro em laboratório e depois num banco de ensaios para automóveis (SIREM).

Os testes em laboratório foram realizados com o objectivo de aperfeiçoar todos os aspectos relativos à aquisição das imagens de *speckle*, à sua sincronização com um *laser* de Nd:YAG, fornecido pela PSA, e à adaptação do sistema óptico ao novo ambiente de medida.

Os testes em ambiente industrial foram realizados sob o banco de ensaios onde se encontrava o automóvel. Desta forma foi possível observar a estrutura inferior da viatura e vários componentes do motor foram analisados com este em funcionamento.

A utilização de um *laser* de Nd:YAG com uma frequência de repetição (10 Hz) altera a configuração usual de sincronismo entre o *laser* e a câmara, uma vez que este *laser* não pode ser comandado por um sinal de *trigger* externo. O *laser* fornecido pela PSA, do fabricante *Spectra-Physics*, tem as seguintes características principais:

- 532 nm – dupla cavidade com bombeamento por lâmpadas de *flash*
- *Seeder* – comprimento de coerência $> 1m$
- Frequência de repetição dos impulsos de 10 Hz
- Energia: 170 mJ por cavidade
- Duração dos impulsos – 10 ns

Foram utilizadas cavidades de Fabry-Perot para observar a qualidade dos impulsos emitidos, em termos de estabilidade e de uniformidade da iluminação. Esta verificação permitiu concluir que se estava em presença de um *laser* que emitia impulsos limpos e sem flutuações de amplitude. Como se referiu no capítulo 3, a *finesse* das franjas determina a qualidade e a monocromaticidade dos impulsos enviados [13].

Uma vez que não é possível recuperar nenhum sinal eléctrico proveniente do sistema *laser* relacionado com os impulsos emitidos, um fotodiodo foi colocado no campo de iluminação do objecto de forma a detectar os impulsos do *laser*. Este sinal é transmitido ao sistema de *trigger*, o que permite sincronizar o duplo impulso do *laser* com a dupla aquisição da câmara CCD. As duas imagens de *speckle* gravadas com esta câmara são transferidas para um PC onde são processadas pelo método da frequência portadora espacial, como se indica na figura 6.18.

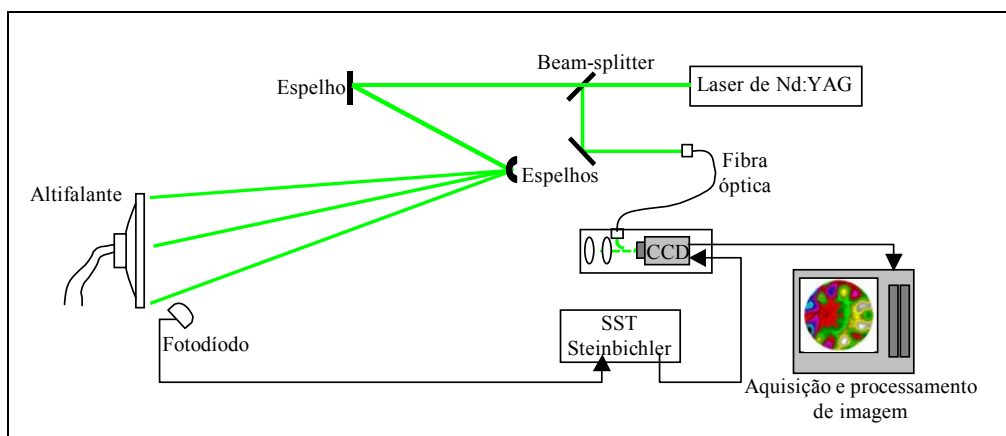


Figura 6.18 – Configuração utilizada durante os testes em laboratório PSA

Tendo em conta as características do *laser* disponível a utilização de apenas uma cavidade, com impulsos separados de 100 ms (10 Hz), originará padrões interferométricos com uma elevada densidade de franjas e por isso de fraca qualidade. Na realidade, este tempo é muito elevado. Um motor em funcionamento num ambiente industrial pode originar, durante 100 ms, deformações de grande amplitude. Aparece assim um grande número de franjas nas imagens o que as pode tornar difíceis de interpretar e desmodular. A solução passou, então, por utilizar uma configuração de duplo-impulso com o *laser* de Nd:YAG da mesma forma que se utiliza com *laser* de Rubi, mas agora com um duplo-impulso entre cavidades diferentes. Esta técnica só é possível com lasers onde existe um sistema duplo com *seeder*, como é o caso do sistema utilizado.

Na figura 6.19 está representado o diagrama de envio de sinais de controlo, na configuração duplo-impulso.

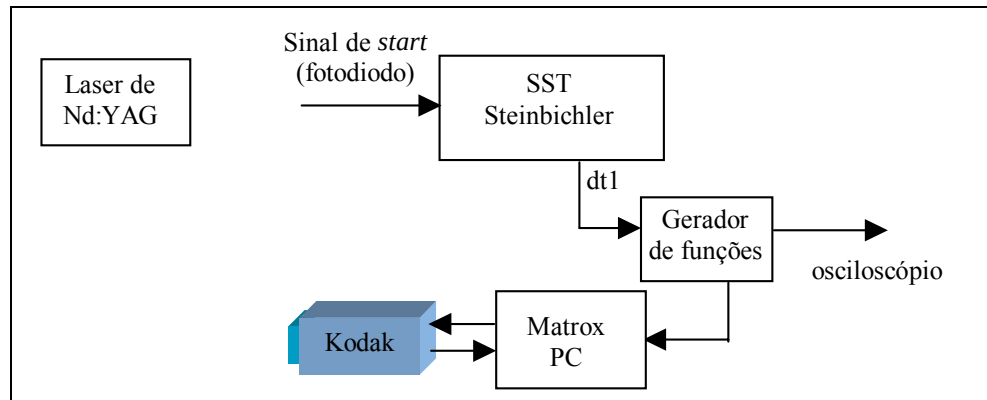


Figura 6.19 – Diagrama de controlo temporal de sinais câmara/laser/fenômeno.

Ao contrário do caso do laser de Rubi, que necessita que o seu tempo de bombeamento para gerar um duplo-impulso seja tido em conta como um atraso temporal, o laser de Nd:YAG, a funcionar em regime livre e com impulsos gerados por cavidades independentes, esse tempo não necessita de ser considerado em nenhum dos atrasos a gerar. Assim, apenas é preciso ter em conta o sinal de atraso a enviar para a câmara CCD.

Na configuração de duplo-impulso, o intervalo de tempo entre as duas aquisições vídeo é ajustável entre $5\ \mu\text{s}$ e dezenas de milissegundos, de acordo com os impulsos *laser* provenientes das cavidades ópticas independentes. O ajuste deste intervalo de tempo está relacionado com a velocidade de deslocamento esperado do objecto em estudo pois o sistema óptico mede o campo de deslocamentos relativo entre as duas aquisições. Neste caso o valor máximo de deslocamento previsto entre as duas aquisições vídeo era de aproximadamente $2\ \mu\text{m}$. A figura 6.20 representa o diagrama temporal da sincronização dos impulsos laser e das aquisições vídeo.

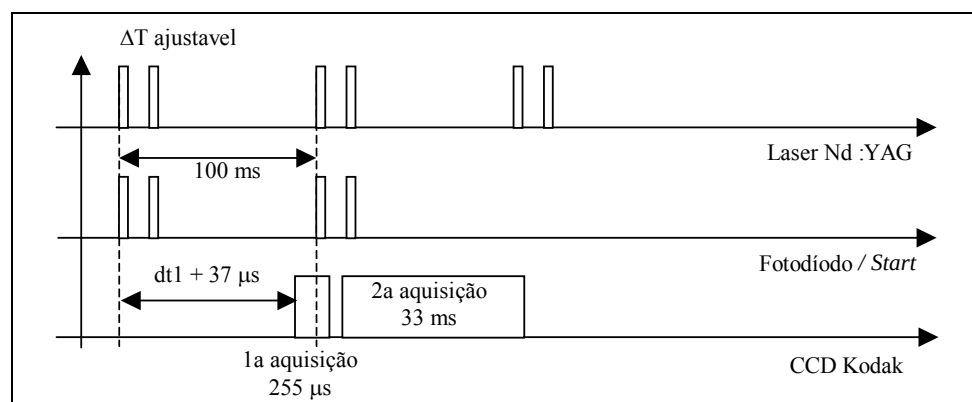


Figura 6.20 – Diagrama temporal de sincronização dos impulsos laser e aquisições vídeo.

O sistema de Holografia-TV foi ajustado através de testes realizados sobre um altifalante, de forma a validar o sistema de iluminação e as condições de ensaio. O campo máximo observado foi de $600 \times 500\ \text{mm}^2$, a $2.5\ \text{m}$ de distância e os impulsos tinham uma energia de $150\ \text{mJ}$ por cavidade. Exemplos de resultados obtidos para

diferentes frequências de excitação do altifalante, entre 2 KHz e 320 Hz, e diferentes distâncias interferómetro/objecto, 1m e 2m, são apresentados na figura 6.21.

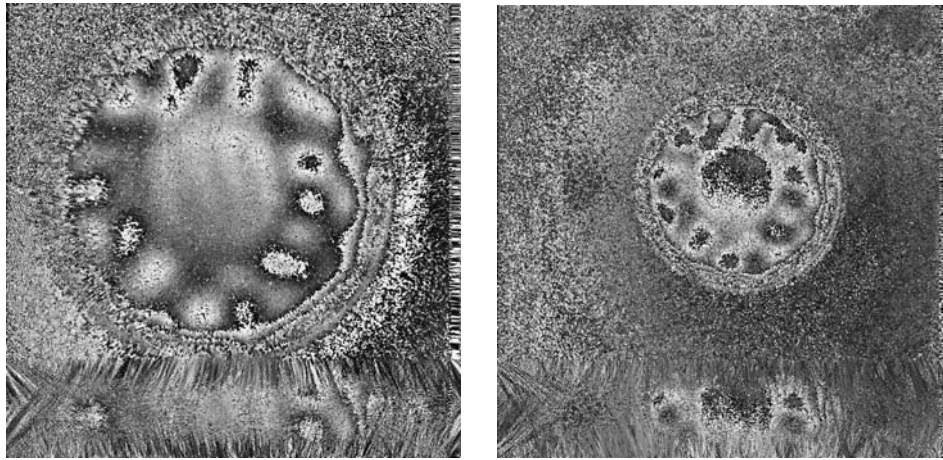


Figura 6.21 – Mapas de fase obtidos para uma frequência de 2KHz a 1m e 2m de distância do objecto.

Este conjunto de resultados foi obtido em laboratório, de forma a considerar todos os possíveis problemas que poderiam ocorrer no que se refere à sincronização entre o *laser* e a câmara. A boa qualidade das imagens de *speckle* obtidas com o altifalante, permitiu deduzir que o sistema poderia ser usado em condições reais.

Testes sob o banco de ensaios

O banco de ensaio SIREM foi desenvolvido pela PSA-Belchamp de forma a simular o comportamento de veículos em termos de fadiga. O banco de ensaios computadorizado permite simular os seguintes parâmetros de forma independente:

- Deslocamento dinâmico de cada roda de acordo com o perfil da estrada
- Movimento do motor devido a variações de binário
- Vibrações do motor
- Efeitos térmicos devidos ao funcionamento do motor
- O arrefecimento devido à passagem de ar quando o carro se move normalmente pode ser simulado injectando ar em frente ao carro até cerca de 130 Km/h.

O banco de ensaios computadorizado permite a análise do comportamento do carro em condições que foram inicialmente observadas em estrada ou em circuito específico: regime do motor, fluxo de ar, mudanças de velocidade,... Cada condição de teste pode ser executada periodicamente.

O *laser* de Nd:YAG foi deslocado pela PSA desde o laboratório (num outro edifício) até ao banco de ensaio automóvel. A figura 6.22 representa esquematicamente a forma como foram realizados estes ensaios.

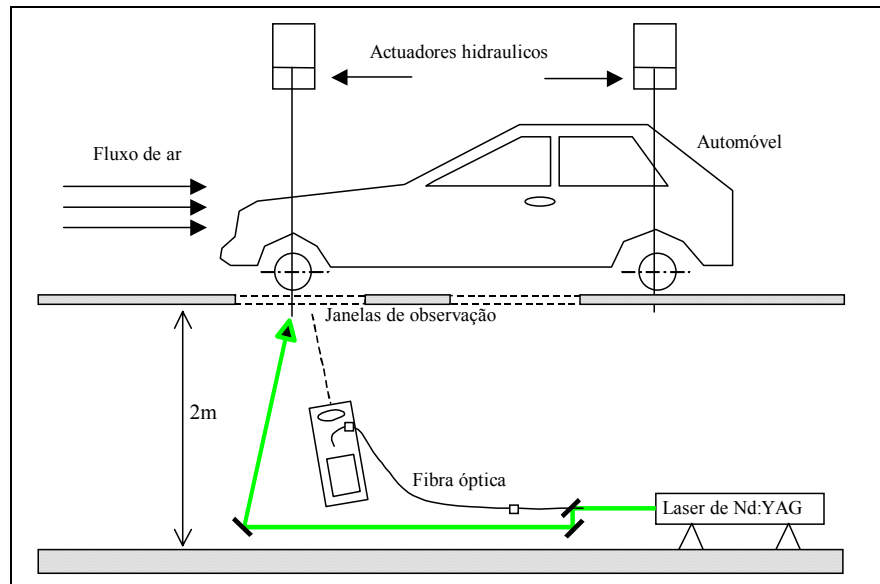


Figura 6.22 – Diagrama esquemático da inspeção realizada no banco de ensaios SIREM.

O sistema óptico e o *laser* de YAG foram colocados no local de observação, sob o automóvel. A estrutura foi observada através de um vidro espesso que isola o sistema do ruído e calor gerados pelo carro em funcionamento. A existência deste vidro não perturba de forma alguma as medições. Durante estes ensaios a distância entre o sistema óptico e a estrutura inferior do carro foi de cerca de 2.2 m e o campo de observação de 500 x 400 mm². As figuras 6.23 e 6.24 apresentam dois resultados obtidos sobre um cârter motor e um tubo de escape respectivamente. Estes componentes foram analisados durante estes ensaios em condições que se podem considerar como quasi-reais. As vibrações estão mascaradas pelo movimento de corpo rígido. Para se medirem os deslocamentos devidos às altas-frequências, o impulso *laser* deve ser dado quando o deslocamento de corpo rígido atinge um máximo ou um mínimo, porque aí, a sua velocidade é nula e a variação de posição entre os dois instantes onde se fazem os disparos *laser* é mínima. Por isso fica apenas registado o movimento devido às vibrações.

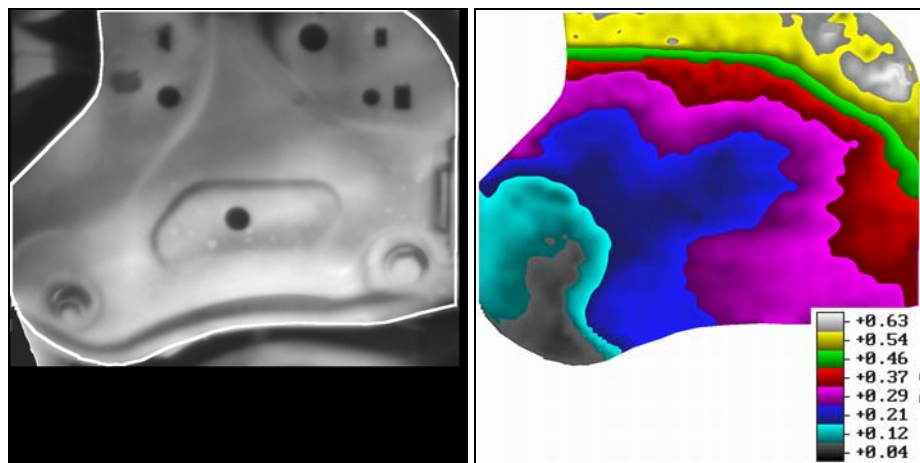


Figura 6.23 – Cârter do motor em vibração [14].

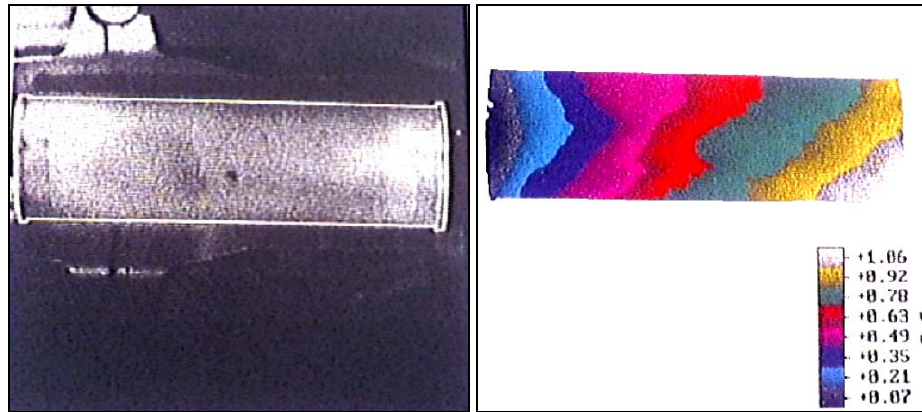


Figura 6.24 - Tubo de escape em vibração [14].

Este conjunto de ensaios pode ser considerado como bastante positivo e permitiu validar o sistema óptico com o *laser* de Nd:YAG. Deve referir-se que se obteve um bom conjunto de resultados e todos os dispositivos funcionaram perfeitamente.

6.2.4 – ESTUDO DE UMA PÁ DE TURBINA

A utilização do princípio físico da reacção como forma de propulsão data do décimo terceiro século da nossa era e é atribuída ao povo chinês. Embora só no séc. XX, após a segunda guerra mundial, os chineses construíssem foguetes e os utilizassem com sucesso, esta tecnologia atingiu um amadurecimento tal que permitiu a sua aplicação às viagens espaciais. Da mesma forma, embora as primeiras turbinas tenham surgido no séc. XVII, para utilização com o vapor, só no final do séc. XX a sua aplicação se vulgarizou.

Hoje em dia as turbinas de gás constituem o meio de propulsão mais vulgarizado em aeronáutica, substituindo o motor alternativo que até finais da década de sessenta foi dominante nesta aplicação. Este tipo de motor, apresenta elevadas relações potência/peso e pode aparecer sob a forma de *turbofan*, *turbojet* ou *turboshaft* consoante a aplicação a que se destina [15]. O desenvolvimento deste tipo de motores representa uma das descobertas que mais contribuiu para o crescimento da aeronáutica comercial.

Deve referir-se que existem essencialmente duas grandes famílias de motores a reacção que se distinguem por um conjunto de características resultantes das diferentes prioridades que orientam o seu projecto. A aviação comercial constitui a maior família e utiliza motorizações onde a eficiência energética, o baixo ruído de funcionamento, e menores emissões poluentes são parâmetros fundamentais. Os motores destinados à aviação militar são projectados e construídos no sentido de otimizar a relação potência/peso sendo os outros parâmetros menos relevantes. Esta família de motores recorre com frequência à pós-combustão como forma de aumentar a potência, embora à custa de elevados consumos e elevadas emissões poluentes.

A maioria dos motores de reacção é constituída por um compressor, normalmente integrando vários andares de compressão, e uma turbina, situada imediatamente após as câmaras de combustão, constituída também por um ou vários andares de expansão. O ar é admitido no compressor à temperatura ambiente, que em elevadas altitudes poderá descer até aos $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, e comprimido adiabaticamente sendo fornecido à câmara de combustão a temperaturas que normalmente não excedem os 400°C . Após a combustão, a massa de ar é expandida na turbina a elevadas temperaturas que podem atingir os 1500°C . Na figura 6.25 pode ver-se uma representação esquemática de uma turbina de gás com a indicação das variações de pressão e temperatura ao longo dos diversos elementos que a compõem.

O projecto e construção destes equipamentos são dos mais exigentes em Engenharia. Trata-se de um domínio multidisciplinar onde os métodos de análise mais avançados são utilizados na optimização do seu desempenho. A Ciência dos Materiais, a Mecânica dos Flúidos, a Química e a Mecânica Estrutural são algumas das áreas envolvidas no desenvolvimento dos motores de reacção. Em qualquer destas áreas os métodos numéricos e as técnicas experimentais são ferramentas fundamentais como auxiliares de projecto. Por último, deve referir-se que para além das elevadas exigências mecânicas especial atenção é também dada à fiabilidade, de forma a respeitar os elevados padrões de segurança exigidos para os equipamentos de aeronáutica.

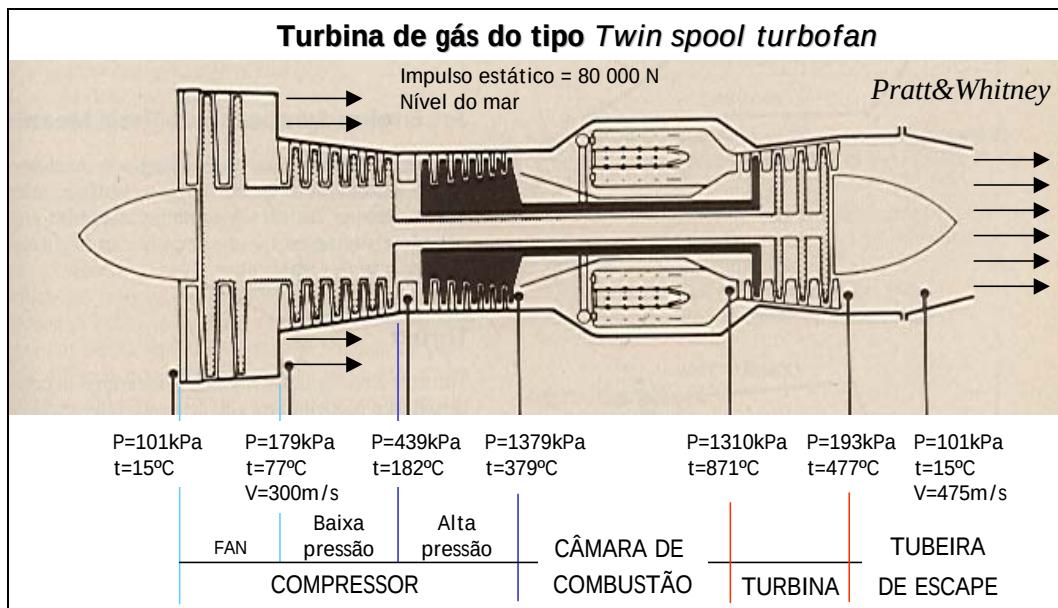


Figura 6.25- Representação esquemática de uma turbina de gás [15]

No trabalho que se segue é descrita uma aplicação das técnicas pulsadas de Interferometria de *Speckle* ao estudo de uma pá de turbina de gás. Este componente é um dos elementos do motor mais severamente solicitado. A optimização do escoamento de flúidos impõe-lhe uma geometria algo complexa que deve cumprir elevadas tolerâncias geométricas num ambiente muito severo. Às elevadas temperaturas, resultantes

da queima do combustível, somam-se as solicitações provenientes do escoamento e a força de tracção resultante das elevadas rotações da turbina e tudo isto num ambiente altamente corrosivo.

Tendo em vista as solicitações e as exigências dimensionais as pás de turbina são normalmente construídas em materiais quimicamente estáveis e com elevada resistência à fluência às temperaturas de funcionamento. A pá utilizada no trabalho que se descreve em seguida é construída numa liga de Ni-Co vulgarmente utilizada nesta aplicação. Trata-se de uma pá de turbina destinada a operar em elevadas solicitações termo-mecânicas (elevadas pressões e elevadas temperaturas) daí a utilização deste tipo de ligas, o mais adequado para este tipo de ambiente hostil.

Um dos estudos de grande importância no dimensionamento da pá de uma turbina é a sua análise dinâmica. A excitação em serviço de algum dos seus modos próprios de vibração induzirá perturbações que interferirão com o escoamento diminuindo a sua eficiência. Como a excitação de um modo próprio implica um aumento da amplitude de vibração podem aparecer também fenómenos de fadiga que contribuam para acelerar a degradação das propriedades mecânicas deste componente.

A caracterização do comportamento dinâmico utilizando técnicas expeditas que não alterem a massa do componente e permitam uma visualização global do seu comportamento sugere a utilização das técnicas de Holografia-TV para este fim.

Na figura 6.26 está representada a pá de turbina utilizada neste estudo. Trata-se de um componente com as dimensões aproximadas de 82 mm x 29 mm.

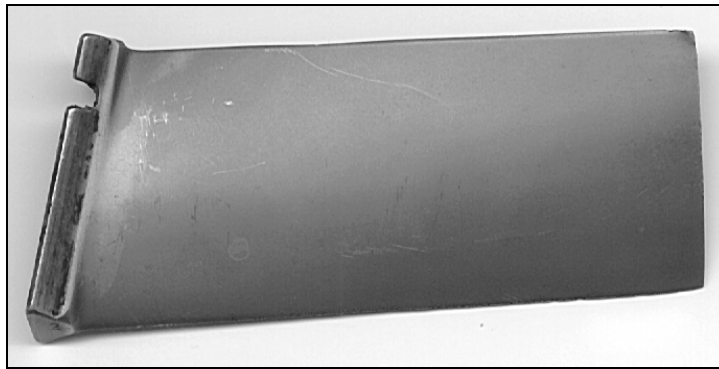


Figura 6.26 – Imagem da pá de turbina utilizada neste ensaio

A holografia-TV é uma técnica global que permite analisar campos de deslocamentos e se adequa na perfeição a este tipo de estudo. Oferecendo a pá de turbina uma face quase plana e sendo os seus modos de vibração sobretudo de flexão e torção induzem deslocamentos na direcção normal à superfície. Desta forma, a montagem de holografia-TV com o vector sensibilidade fora-do-plano permite obter de forma expedita e com grande resolução os modos naturais de vibração. É também uma técnica que não necessita de qualquer contacto com os objectos a medir, pelo que não introduz alterações de massa [16]. Os métodos discretos tradicionais, baseados na utilização de acelerómetros podem alterar o comportamento dinâmico da estrutura devido ao efeito da sua massa, como se comprova mais adiante.

Previamente ao estudo experimental foi realizada uma análise modal por Elementos Finitos recorrendo ao código ALGOR [17]. Dado que a geometria da pá não é constituída por formas regulares foi necessário recorrer a uma técnica de medição manual através de comparadores para obter uma malha de elementos finitos que a descrevesse com rigor. A figura 6.27 representa uma vista isométrica da malha obtida. No Anexo A desta tese descreve-se em detalhe o trabalho efectuado para realizar o levantamento de forma da pá.

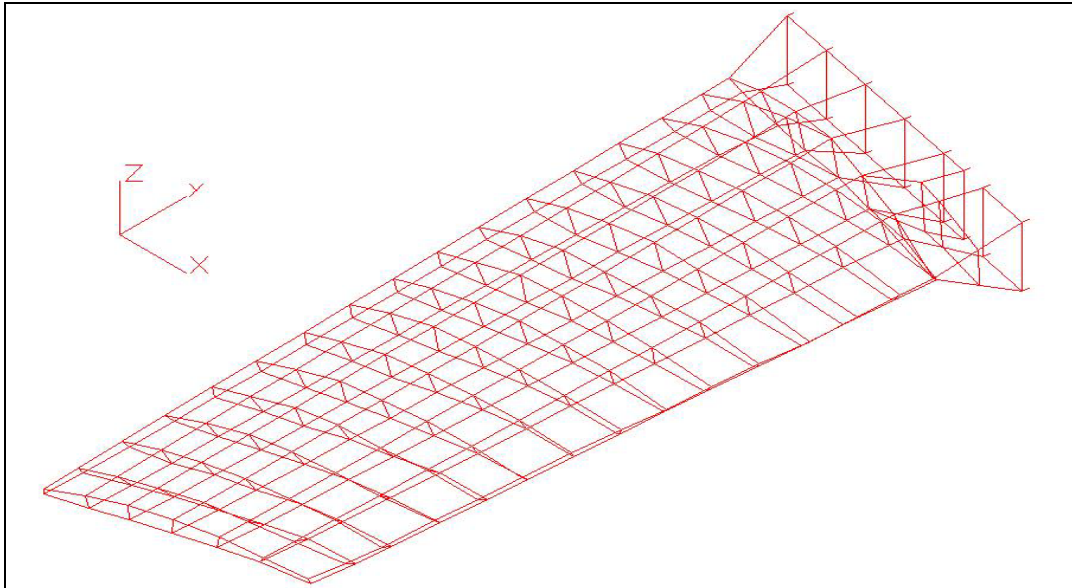


Figura 6.27 – Vista isométrica da malha de elementos finitos utilizada para a simulação modal.

Esta análise prévia com recurso a métodos numéricos, exigiu também o conhecimento das propriedades mecânicas do material constituinte. Em relação a estes parâmetros, e dado que se trata de uma liga de Ni/Co, foi utilizado um módulo de Young de 200 GPa, um coeficiente de Poisson de 0.3 e uma massa específica de 8890 Kg/cm³.

A técnica experimental foi implementada com recurso a um *laser* pulsado. Este tipo de fonte luminosa, com duração de impulsos de 30 ns, permite que as medições sejam praticamente imunes aos ruídos ambientais. O tempo entre impulsos pode variar entre 0 e 1 ms pelo que é possível ajustá-lo à amplitude de vibração evitando exceder a gama de medida para grandes amplitudes. A utilização da Holografia-TV de duplo-impulso (estroboscópica) para a análise de vibrações permite ainda obter padrões de franjas cuja intensidade varia linearmente com o deslocamento, como referido anteriormente.

A montagem experimental que serviu de base a este estudo está representada na figura 6.28. O *laser* de Nd:YAG, disponível no LOME, foi utilizado neste trabalho. Os impulsos emitidos pelo sistema *laser* são separados através de um *beam-splitter* 90/10 gerando dois caminhos diferentes que dão origem ao feixe de referência e ao feixe objecto. O feixe objecto, mais intenso, é conduzido desde o *beam-splitter* através de espelhos até ao vidro despolido que cria uma iluminação difusa sobre o objecto. De referir que foram utilizados espelhos adequados às elevadas potências geradas em cada impulso (180 mJ/30 ns). A luz

difundida pelo objecto é depois recolhida pela lente de imagem que a conduz ao alvo de um CCD. O feixe de referência, menos intenso, é conduzido através de elementos ópticos convencionais até a uma fibra óptica monomodo. Esta fibra permite fazer incidir o feixe especular de referência no CCD segundo uma direcção coincidente com o eixo do feixe objecto. Esta configuração permite criar um padrão de interferência com uma frequência espacial compatível com a resolução do CCD.

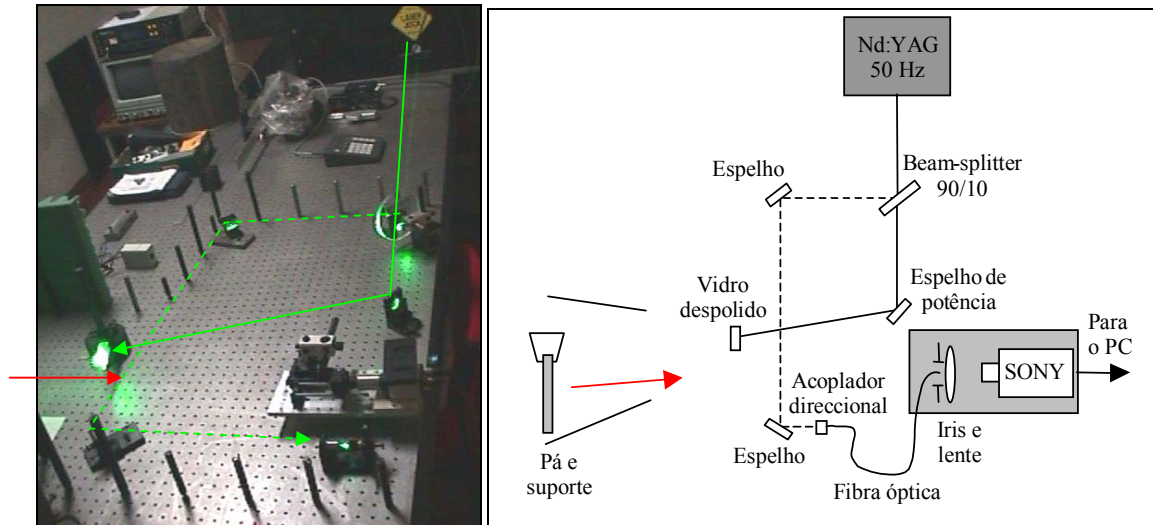


Figura 6.28 – Vista da montagem experimental e esquema do sistema interferométrico utilizado.

A íris colocada em frente à lente de imagem permite controlar a quantidade de luz recebida pelo CCD e ajustar o tamanho do *speckle*. Desta forma consegue-se obter uma relação de intensidades I_o/I_r ideal e um tamanho de *speckle* compatível com o tamanho de pixel da câmara [18]. Um atenuador colocado na entrada da fibra permite ajustar a intensidade do feixe de referência.

O registo electrónico utilizado foi a câmara CCD Sony XC8500CE com um módulo de memória CMA-70. Como já foi referido esta câmara permite fazer uma dupla-aquisição assíncrona com tempos de *transfer-gate* da ordem dos 5 μ s. Graças ao seu módulo de memória, a primeira imagem é retida o tempo necessário à sua transferência enquanto a segunda fica armazenada no detector. Desta forma é possível registar duas imagens separadas no tempo por 5 μ s.

Na figura 6.29 pode ver-se a pá iluminada pela radiação *laser* ($\lambda=523$ nm). Para verificar temporalmente a colocação dos impulsos foram utilizados dois sinais eléctricos. Um sinal provinha de um fotodíodo rápido, que pode ver-se no centro da figura 6.29 a), e permitia determinar a saída dos impulsos. O outro, proveniente de um transdutor óptico de velocidades baseado no efeito Doppler (laser vibrometer, Polytech), permitia caracterizar o deslocamento harmónico da pá. Na figura 6.29 b) pode observar-se o spot correspondente ao ponto de medição. Estes sinais eléctricos permitem ajustar os tempos de disparo relativamente à fase da vibração.

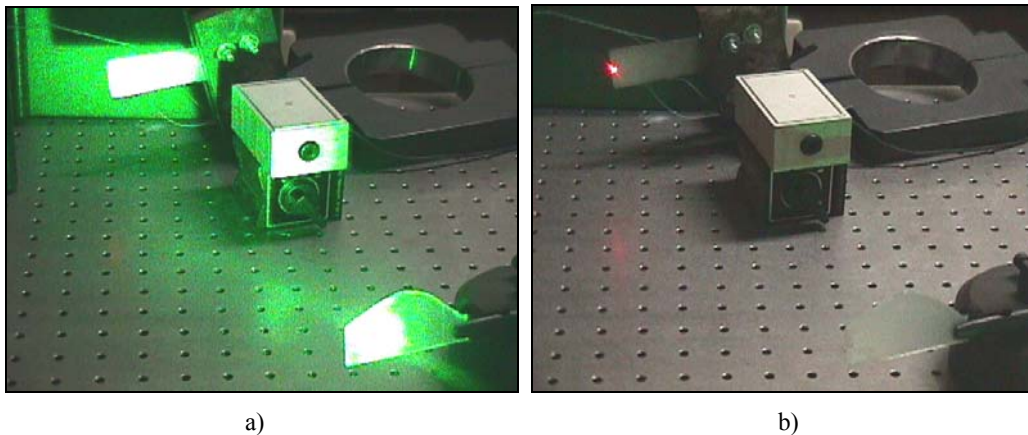


Figura 6.29 – Sistemas de obtenção dos sinais eléctricos de sincronismo. a) Fotodíodo iluminado pelos impulsos *laser*. b) Feixe de leitura do *laser vibrometer* sobre a pá em vibração.

Na figura 6.30 representam-se ambos os sinais em duas situações de medida obtidos num *display* de um osciloscópio digital LeCroy. Um dos canais do osciloscópio recebe um sinal proveniente do fotodíodo e outro canal recebe o sinal proveniente do sistema Doppler. Uma vez que este fornece um sinal proporcional à velocidade do movimento harmónico da pá, os pontos de velocidade nula são os pontos de amplitude de vibração máxima. É entre estes instantes que são gerados padrões com o maior número de franjas.

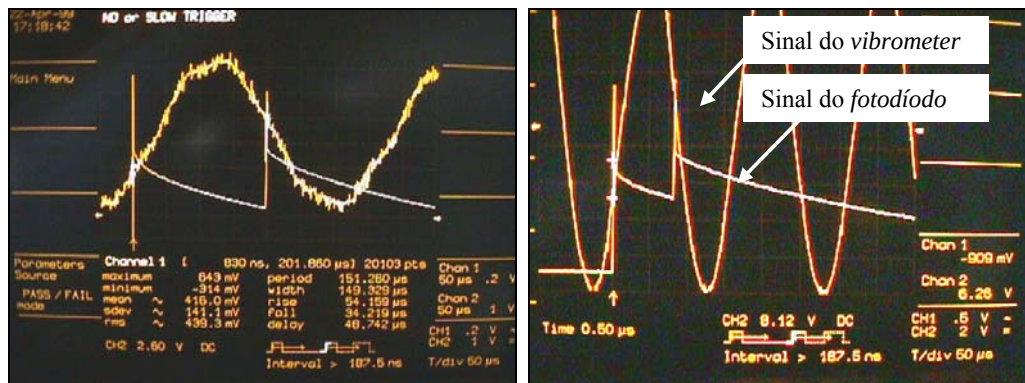


Figura 6.30 - Imagem do osciloscópio Le Croy com as curvas de velocidade de vibração da pá e os instantes de disparo do *laser* Nd:YAG

O sistema de *laser* Doppler foi ainda utilizado como transdutor sem contacto na obtenção das frequências naturais de vibração. Utilizando-o em conjunto com um analisador de espectros foi investigada uma banda de frequências entre 0 Hz e 25.6 KHz. A figura 6.31 representa os dois tipos de sinal obtidos no analisador de espectros (resposta em frequência) e no *laser* Doppler *vibrometer* (deslocamentos ou velocidades).



Figura 6.31 – Sistemas utilizados na determinação da resposta em frequência da pá de turbina.

A determinação da função de resposta em frequência foi obtida excitando a pá da turbina com ruído branco através de um *shaker*. Desta forma foi gerado um espectro de frequências onde coexistem todas as frequências de vibração, dentro de uma determinada gama de trabalho (0 Hz a 25.6 KHz).

Para a fixação da pá foi concebido um suporte que a fixava pela sua raiz a um maciço através de uma ligação aparafusada com a qual se pretendeu simular um encastramento. Pela análise da função de resposta em frequência foi possível ajustar convenientemente o aperto de forma a garantir a eficiência do encastramento. Sendo o sinal de excitação gerado pelo analisador de espectros é possível correlacioná-lo com o sinal de resposta da estrutura, ver figura 6.32. Obtém-se assim a função de resposta em frequência com a qual é possível identificar as frequências naturais de vibração existentes nessa gama. Essas frequências são aquelas para as quais a atenuação do sinal é menor e são identificadas na comparação do sinal obtido para a magnitude com o sinal obtido para a fase. Neste trabalho foi utilizado um analisador de espectros Bruel & Kjaer e um transdutor de vibração da Polytech modelo OFV-303 com o controlador OFV-3001.

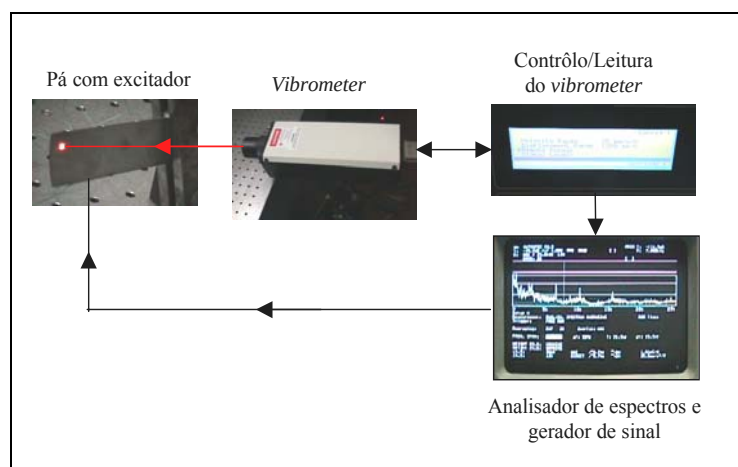


Figura 6.32 – Esquema da sequência de aquisição de dados na determinação da distribuição modal.

A identificação obtida é tanto mais fiável quanto mais elevada for a coerência entre a excitação e a resposta. As figuras seguintes 6.33 a) e b) apresentam o sinal obtido para a magnitude e o sinal de coerência obtido numa das medições. Desta análise foi possível identificar as seguintes frequências naturais de vibração: 448 Hz; 1056 Hz; 2240 Hz; 2656 Hz; 6240 Hz; 9024 Hz e 22432 Hz

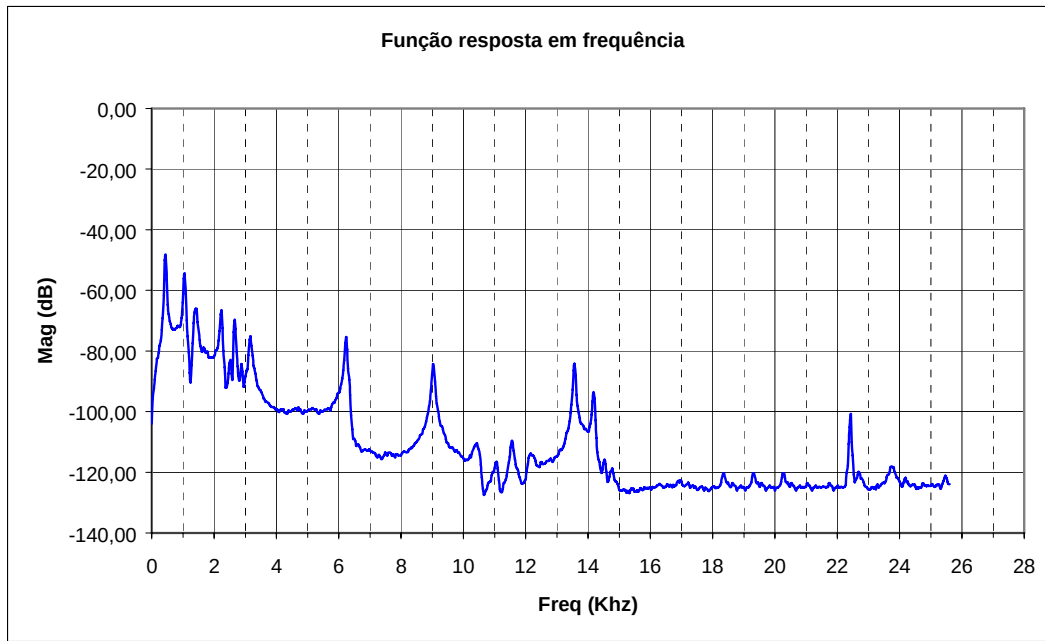


Figura 6.33 a) – Gráfico da função resposta em frequência da pá.

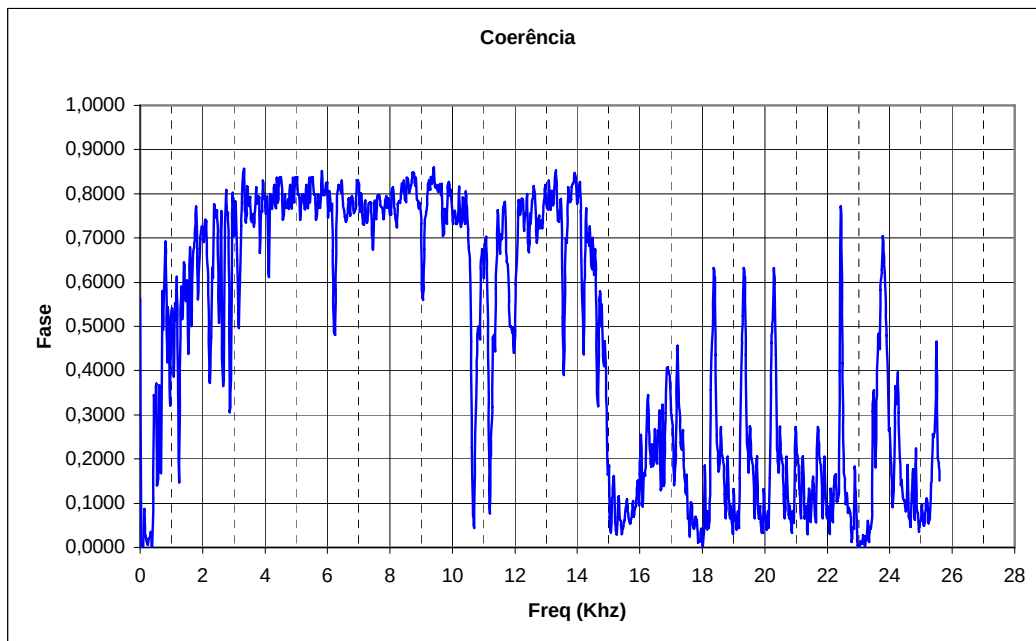


Figura 6.33 b) – Representação da fase da vibração da pá

Após a primeira fase deste trabalho passou-se à verificação experimental dos modos de vibração através do sistema de Holografia-TV desenvolvido nesta tese. Como já foi referido anteriormente esta técnica permite visualizar as formas modais ao mesmo tempo que determina as suas frequências. Tudo isto sem contacto com a estrutura.

Tendo em conta as características do *laser* disponível foi decidido utilizar uma configuração de duplo-impulso no registo dos interferogramas. Este laser duplo de Nd:YAG dispõe de um sistema de *seeder* para que as duas cavidades possam gerar impulsos coerentes entre si.

Tal como no caso dos ensaios na PSA, a utilização de apenas uma cavidade, com impulsos separados de 20 ms (50 Hz), originará padrões interferométricos com uma elevada densidade de franjas e por isso difíceis de processar. No entanto, ao contrário do laser fornecido pela PSA, o laser disponível no LOME permite a obtenção de um sinal eléctrico relacionado com os impulsos laser. É este sinal que será utilizado como sinal de *trigger* do sistema de sincronização temporal. De referir que nestes ensaios foi o sistema de sincronização temporal (SST) desenvolvido no LOME que foi utilizado. Este sistema de *trigger* gera então dois atrasos, um para o *shutter* electro-mecânico, para que este bloqueie os impulsos seguintes e outro para a placa vídeo, que controla a aquisição da câmara CCD. O bloqueio do *shutter* electro-mecânico aos impulsos seguintes é importante pois, caso contrário, a luz emitida ainda irá sensibilizar a parte final do segundo registo vídeo. Na figura 6.34 está representado o diagrama de envio de sinais de controlo, na configuração de duplo-impulso.

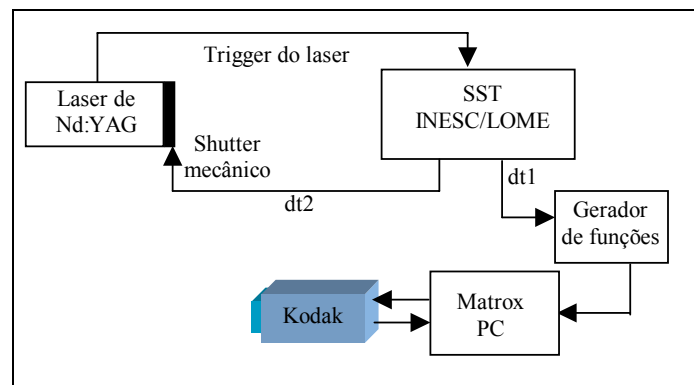


Figura 6.34 – Representação da fase da vibração da pá

Na configuração de duplo-impulso, o intervalo de tempo entre as duas aquisições vídeo é ajustável entre 5 μ s e dezenas de milissegundos, de acordo com os impulsos *laser* provenientes das cavidades ópticas independentes. O ajuste deste intervalo de tempo está relacionado com a velocidade de deslocamento esperada para o objecto em estudo pois o sistema óptico mede o campo de deslocamentos relativo entre as duas aquisições. O esquema da figura 6.35 representa o diagrama temporal da sincronização dos impulsos laser e das aquisições vídeo. A obtenção dos dois sinais eléctricos referidos anteriormente permite construir um diagrama temporal em que os registos interferométricos são gravados nos momentos em que os impulsos *laser* são disparados. É nestes instantes que o *shutter* mecânico do *laser* está aberto. Para além disso os instantes de registo e de disparo podem ser ajustados em função da amplitude de vibração da pá.

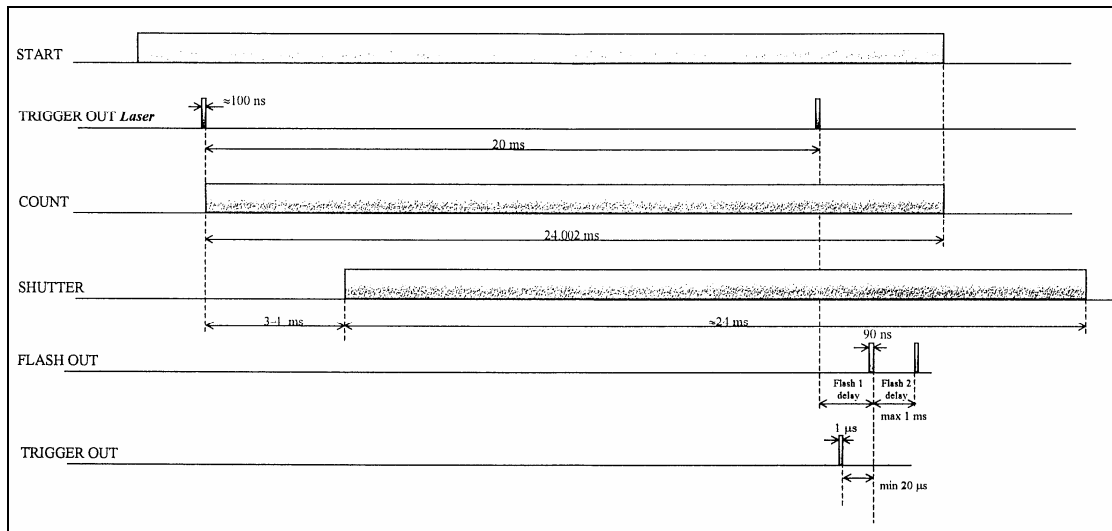


Figura 6.35 — Diagrama temporal utilizado na sincronização CCD/laser/vibração da pá.

A figura 6.36 apresenta parte da electrónica utilizada para a estimulação da pá de turbina e o SST LOME/INESC desenvolvido. O sistema de estimulação da pá é constituído por uma fonte geradora de sinal e amplificador que excitam um cristal piezoeléctrico (Vernitron Lda, 0,0003 kg) colado na proximidade do encastramento da pá. Dadas as elevadas densidade e rigidez do material constituinte da pá foi necessária a utilização de um amplificador de sinal áudio mono canal para gerar a tensão eléctrica necessária à excitação dos diversos modos próprios da estrutura.

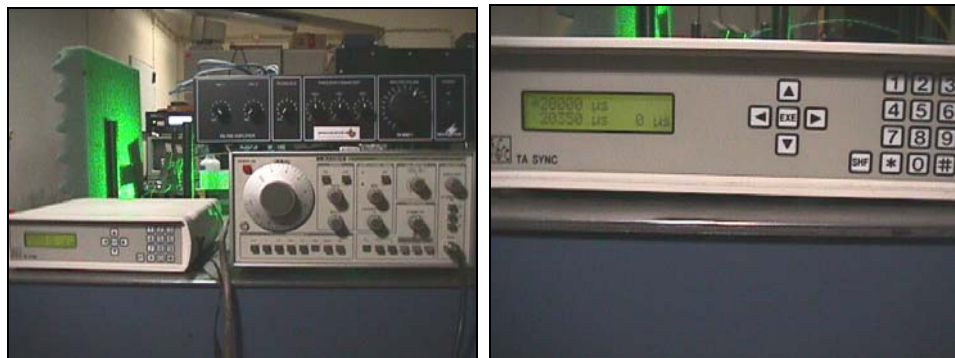


Figura 6.36 – Electrónica de sincronização e de excitação da pá

A figura 6.37 apresenta o módulo de memória externa que permite ao sistema de aquisição de imagens realizar a dupla-exposição num intervalo de tempo tão reduzido. A câmara CCD Sony adquire a primeira imagem em 90 μ s e transfere-a para a memória em cerca de 3 μ s. O detector de CCD é inicializado, regista a segunda imagem e armazena-a o tempo necessário à sua leitura pela placa de imagem. Trata-se de uma solução engenhosa que permite também, por acção num dos interruptores, utilizar a câmara na aquisição em contínuo. Este último modo de funcionamento é muito útil para o ajuste inicial do sistema.

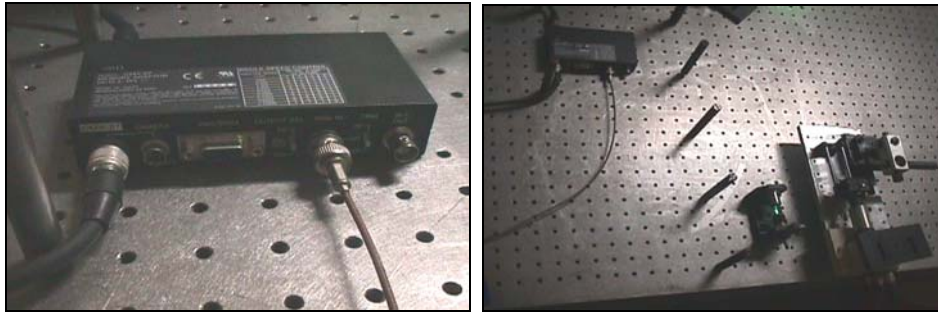


Figura 6.37 – Módulo de memória da câmara CCD e sua inclusão no sistema de Holografia-TV.

A figura 6.38 apresenta em pormenor o interferómetro utilizado na gravação dos hologramas. Trata-se de um sistema de Holografia-TV em que a referência é realizada por fibra óptica. Na montagem que se construiu os vários componentes ópticos (CCD, lente e íris), utilizados na obtenção do feixe objecto, foram montados numa plataforma metálica sobre dois eixos comuns. O feixe de referência, dirigido até ao CCD através de uma fibra óptica monomodo, tem o seu alinhamento e abertura controlados por um sistema de posicionadores de translação e rotação. Deve referir-se que a colocação de um suporte metálico para a extremidade da fibra no eixo do sistema óptico não interfere na qualidade da imagem registada pelo CCD [19].

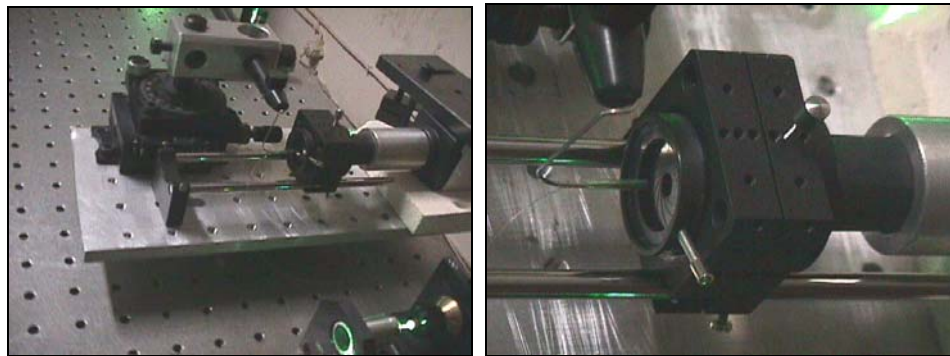


Figura 6.38 – Sistema interferométrico e pormenor da introdução do feixe de referência no eixo do sistema.

A montagem do interferómetro numa base de alumínio permitiu obter uma solução compacta e com elevada rigidez. Desta forma conseguiu-se um sistema portátil e com elevada imunidade aos desalinhamentos devidos a sua manipulação. A solução utilizada para o encaminhamento do feixe de referência permite uma boa mobilidade do sistema e um elevado contraste no registo dos padrões de *speckle*. Como foi utilizada uma fibra monomodo com um núcleo de $5\mu\text{m}$ houve necessidade de utilizar um acoplador direccionado para que a injeção de luz na fibra fosse maximizada e fácil de obter. Na figura 6.39 pode observar-se o sistema de posicionamento utilizado para focar o feixe de referência na entrada da fibra e com a orientação mais conveniente. Este sistema tem possibilidade de ajustes transversais e longitudinais e possui uma objectiva microscópica de baixo poder focal NA 25 10X.

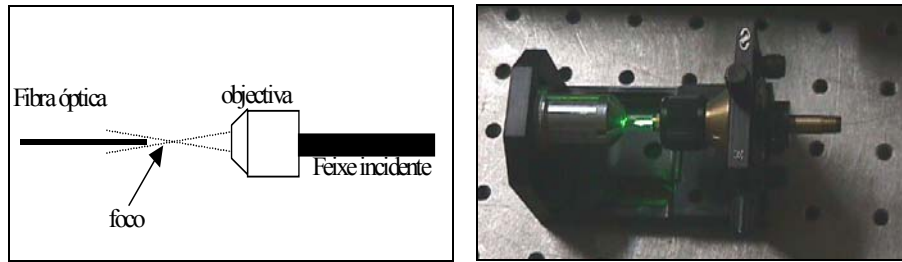


Figura 6.39 – Acoplador direccional e objectiva microscópica utilizados na injeção de luz na fibra óptica.

Dado que as medições com *lasers* pulsados envolvem um processo de registo mais complexo foi realizado previamente um conjunto de medidas com um *laser* contínuo. Neste caso foi utilizado um *laser* de argon e foram registados hologramas em *time-average*. Na figura 6.40, dois resultados obtidos por *time-average* e com *Speckle Noise Reduction* mostram claramente essa modulação, sendo a franja de ordem 0, correspondente a uma amplitude de vibração nula, cerca de 5 vezes mais intensa que as restantes [20].

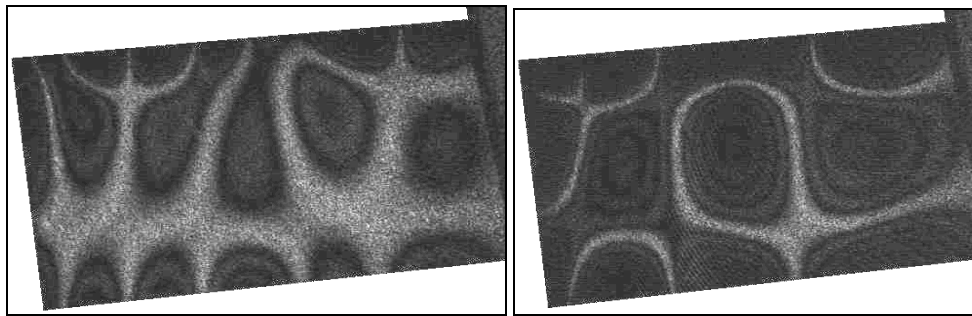


Figura 6.40 – Imagens de dois resultados em *time-average* com *Speckle Noise Reduction*

Embora com estas limitações o registo em *time-average* é muito utilizado dado que permite caracterizar de forma expedita os vários modos de vibração de uma estrutura.

Os resultados da análise modal obtidos através da simulação por elementos finitos são apresentados em seguida juntamente com os resultados obtidos pelas técnicas ópticas, figura 6.41. Estes últimos, dizem respeito às medidas de amplitude de vibração obtidas por técnicas de *time-average*, com *Speckle Noise Reduction*, através de um *laser* contínuo de Árgon e por técnicas de duplo impulso com um *laser* duplo de Nd:YAG.

São apresentadas seis formas modais, num intervalo de frequências que varia entre zero e cerca de 22 KHz. A tabela 6.1 apresenta os valores obtidos para seis frequências naturais de vibração da pá de turbina, de três formas diferentes:

- a simulação numérica através do código de elementos finitos ALGOR
- a análise modal experimental com acelerómetros através da excitação da pá com ruído branco
- a Holografia-TV por duplo-impulso com excitação harmónica e varrimento em frequência.

Nº modo	f_{algor} (Hz)	f_{espectro} (Hz)	f_{YAG} (Hz)
1	660	490	490
2	2384	2240	2264
3	2642	2656	2680
4	6238	6240	6256
5	9222	9056	9009
6	22323	22432	22427

Tabela 6.1 – Frequências naturais de vibração de uma pá de turbina.

Estes resultados apresentam uma boa correlação entre os dois tipos de análise, numérica e experimental. No gráfico da figura 6.41 estão representados os valores de frequências da tabela 6.1. Aqui se pode observar que a sobreposição dos valores é quase perfeita na gama de frequências consideradas. No entanto, se observarmos mais em detalhe verifica-se, sobretudo para os primeiros modos, que os valores de frequência obtidos numericamente são superiores aos valores obtidos experimentalmente, quer através da excitação por ruído branco, quer através da Holografia-TV.

Estas diferenças, entre os valores experimentais e os obtidos por simulação por elementos finitos, podem ser explicados pelo facto de:

- a simulação não tomar em conta os amortecimentos internos do material. (f diminui)
- a simulação não tomar em conta o amortecimento causado pela viscosidade do ar (f diminui)
- dificuldades em fazer o levantamento próximo da raiz da pá, onde a massa é superior (f diminui).

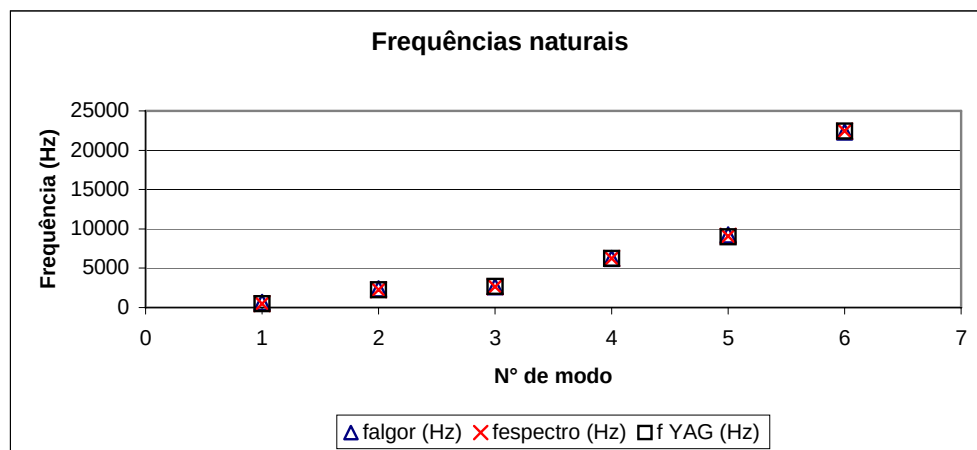
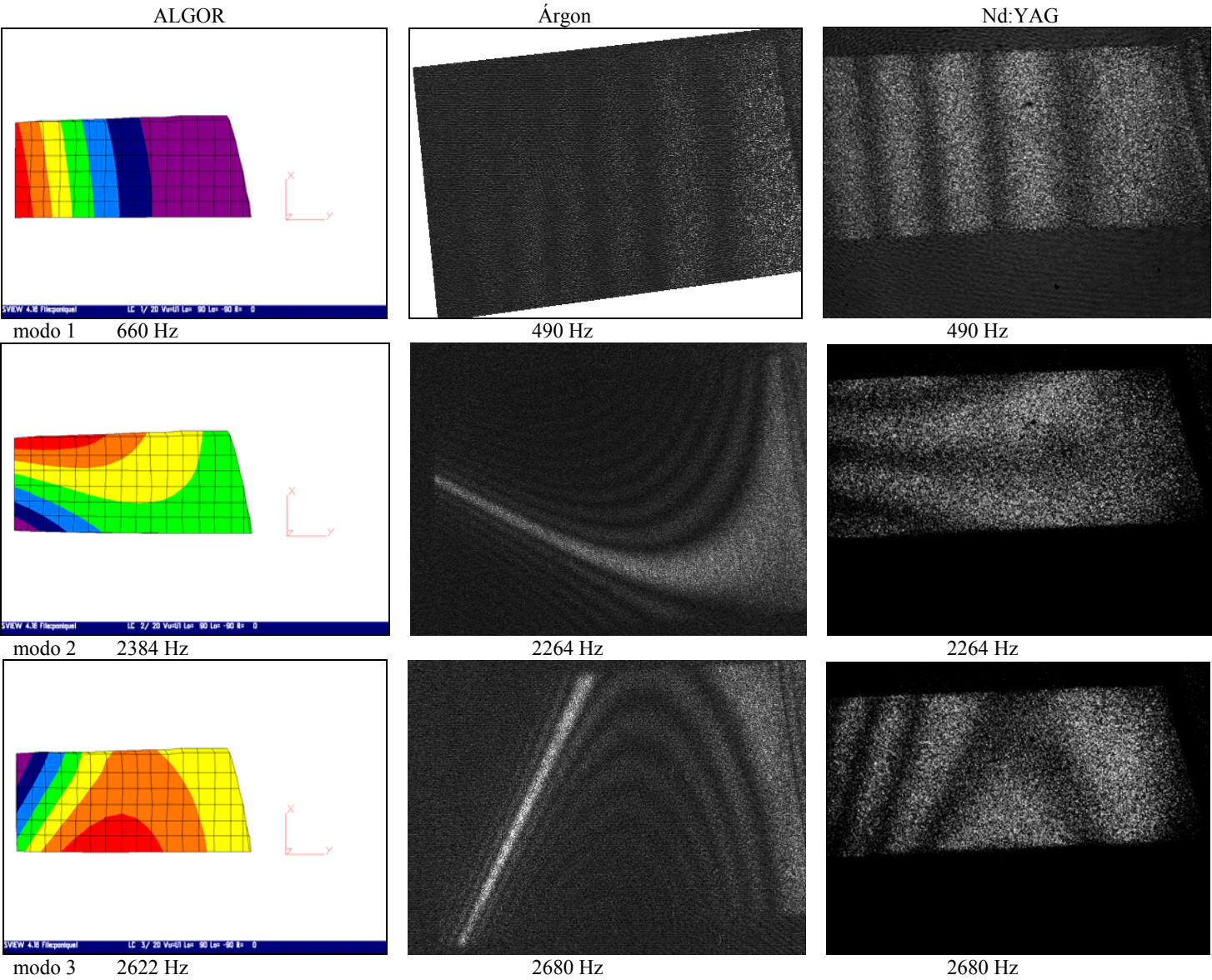


Figura 6.41 - Gráfico representativo das frequências naturais de vibração e correspondência entre valores obtidos por via numérica e valores experimentais.

Nas imagens da figura 6.42 verifica-se que as formas modais obtidas numericamente estão em harmonia com os resultados experimentais.



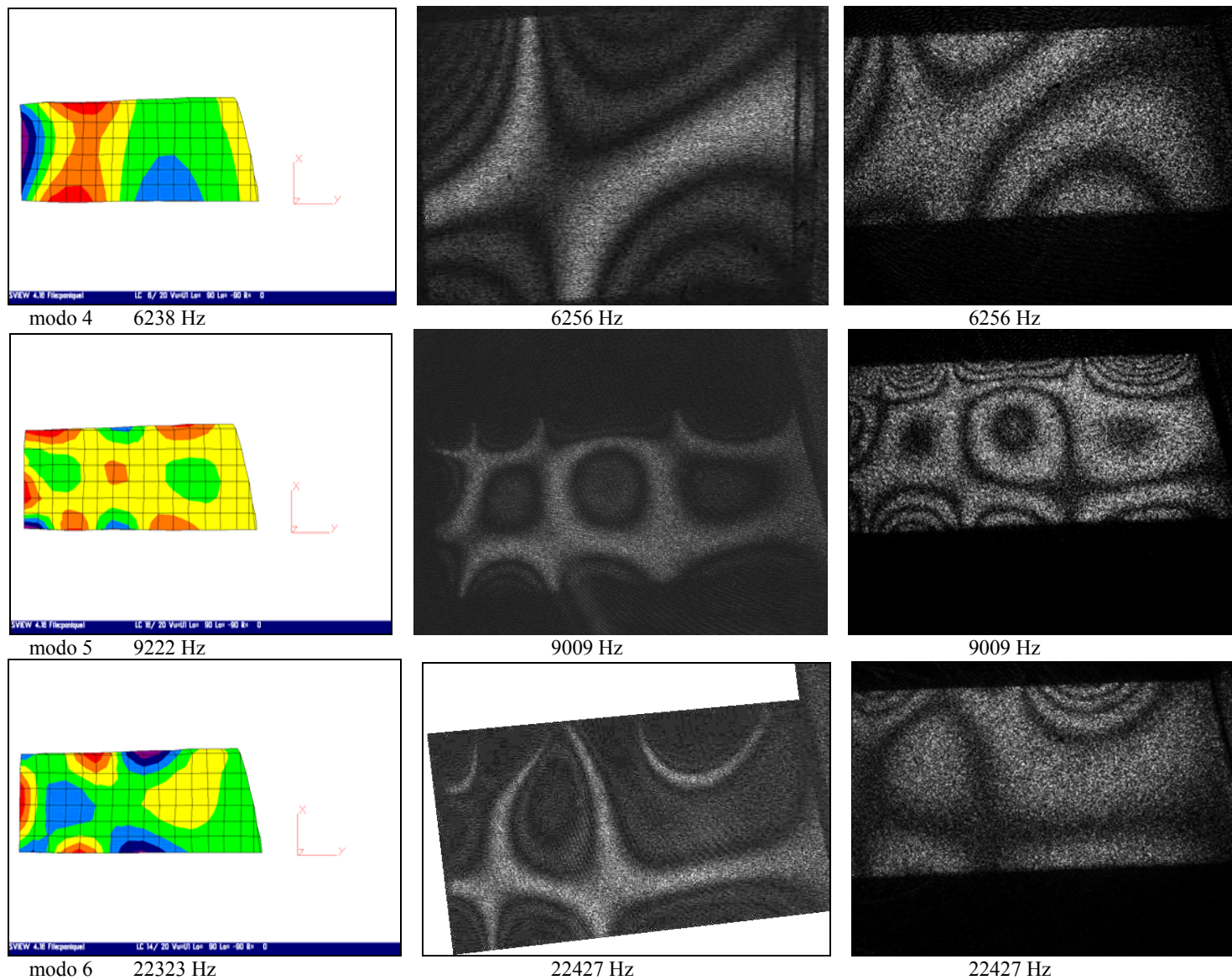


Figura 6.42 – Resultados da solução obtida por elementos finitos e por interferometria de *speckle* com um *laser* contínuo de Argon e com um *laser* pulsado de Nd:YAG.

Os resultados apresentados em seguida pretendem pôr em evidência as enormes vantagens da utilização de técnicas globais e sem contacto na análise modal deste tipo de estrutura. A figura 6.43 mostra a pá de turbina com um íman de pequenas dimensões a simular a colocação de um acelerómetro. A sua reduzida massa influencia pouco a frequência de vibração do modo, no entanto, no que se refere à forma a sua influência é enorme e pode mesmo ocultar o modo de vibração.

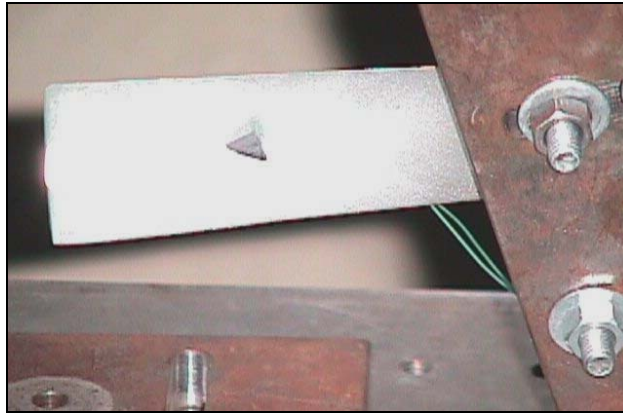


Figura 6.43 – Fotografia da pá de turbina com uma massa que simula um acelerómetro.

Com efeito, os resultados que se apresentam em seguida mostram isso mesmo. Na figura 6.44 o primeiro interferograma apresenta o modo de vibração natural referido anteriormente como 5, a 9009 Hz. Nesta situação o íman ainda não foi colocado sobre a pá. A figura seguinte apresenta um interferograma obtido para a mesma frequência mas desta vez com o íman colocado numa linha nodal. Aqui verifica-se, desde já, que o modo é alterado na sua forma. As duas imagens seguintes apresentam o deslocamento do íman para um ponto de amplitude de vibração máxima. Aqui, a vibração da placa desaparece por completo e o modo de vibração passa completamente despercebido.

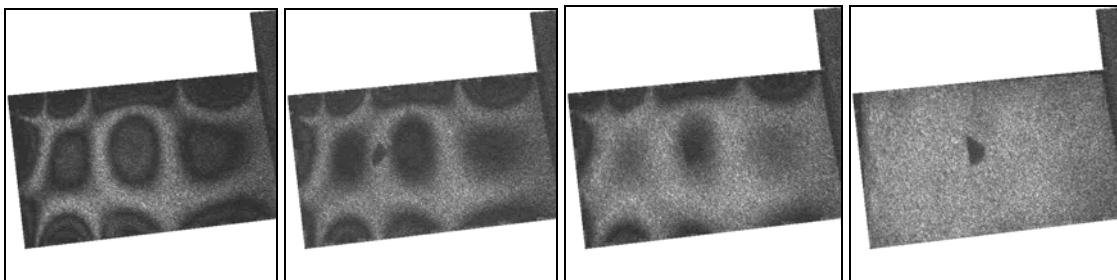


Figura 6.44 – Efeito da colocação de uma massa sobre a pá em vibração a 9009 Hz.

A figura 6.45 apresenta o mesmo fenómeno mas desta vez para uma frequência de vibração mais baixa, 6500Hz.

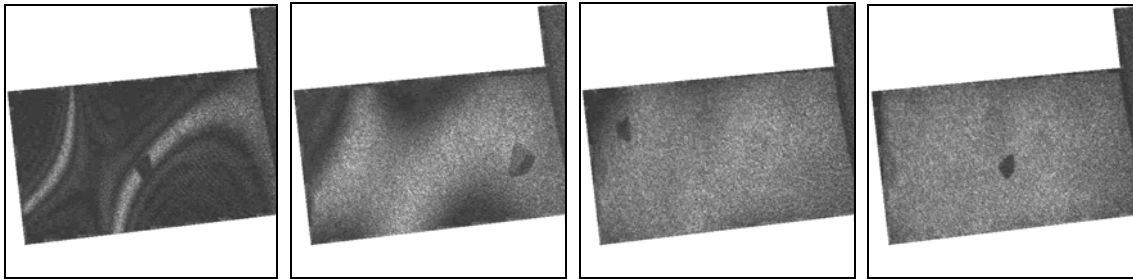


Figura 6.45 – Efeito da colocação de uma massa sobre a pá em vibração a 6256 Hz.

O fenómeno repete-se sempre que se coloca a reduzida massa do íman, sobre uma zona de amplitude de vibração não desprezável

6.3 – MEDIÇÕES COM EXCITAÇÃO POR CHOQUE

A análise modal tem uma importante limitação no estudo de fenómenos transitórios de alta velocidade, como é o caso da propagação de ondas de tensão. Uma técnica de aproximação modal não é conveniente pois necessitaria de um elevado número de modos de vibração para apenas obter uma aproximação à solução do problema. No limite, a caracterização da resposta à excitação com um impulso de Dirac, necessitará de um número infinito de modos.

No texto que se segue pretende-se por em evidência as vantagens dos sistemas de Interferometria de *Speckle* no estudo de fenómenos transitórios devidos a impactos entre corpos. Esta técnica permite obter as várias formas assumidas pelos objectos durante a propagação da perturbação e, a partir delas, as distribuições de tensão associadas.

A principal característica de um impacto é a geração de forças relativamente elevadas, nos pontos de contacto, durante tempos relativamente curtos. Este tipo de forças é geralmente designado por forças impulsivas. Neste trabalho foi estudado o impacto de um corpo rígido contra uma placa que se considera elástica durante o tempo de actuação da força.

As técnicas pulsadas têm sido utilizadas com sucesso na caracterização dos campos de deslocamentos gerados durante a propagação de ondas de tensão. Embora estas técnicas possam ser utilizadas na caracterização dos deslocamentos no plano e fora do plano, é a caracterização das ondas de flexão, geradas no segundo caso, aquela que é apresentada neste trabalho.

Quando dois corpos chocam entre si é conservada a quantidade de movimento. No entanto, parte da energia cinética dos corpos é transformada noutras formas de energia. Energia de deformação elástica, transferida para movimentos internos de vibração das partículas dos materiais, energia perdida sob a forma de calor e a

restante é consumida na plastificação localizada nos pontos de contacto. Esta última parcela é nula no caso dos choques considerados perfeitamente elásticos.

O tratamento deste tipo de solicitações assume particular relevância no projecto de estruturas ligeiras utilizadas na construção de veículos de transporte [21]. Nestes casos procura-se obter a melhor resposta da estrutura à carga impulsional. O amortecimento tem aqui uma importância menor quando comparado com situações geradas por cargas harmónicas ou periódicas. A máxima resposta da estrutura será atingida num curto espaço de tempo, antes das forças de amortecimento poderem absorver parte da energia fornecida à estrutura pelo que não será considerado.

Os resultados obtidos experimentalmente são comparados com os valores resultantes de uma análise numérica prévia. Na análise numérica foi utilizado o código de Elementos Finitos ADINA e uma rotina desenvolvida especialmente para esta aplicação em FORTRAN. Nesta simulação numérica considera-se que a carga impulsional tem a forma de um meio seno, onda gerada pelo impacto entre uma esfera e uma barra de extensão infinita.

6.3.1 - PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA DE CHOQUE NUMA PLACA METÁLICA

Desde 1971, ano em que foram apresentados os primeiros resultados do estudo da propagação de ondas de flexão em vigas, que a Interferometria Holográfica tem vindo a desempenhar um papel fundamental na caracterização de campos de deslocamentos transientes [22]. A análise de materiais tão diversos como a madeira, o metal ou os compósitos foi já realizada recorrendo a esta técnica e em diversas configurações geométricas (vigas, placas, tubos, discos,...) [23,24,25,26]. As configurações ópticas de registo foram evoluindo de forma a permitirem resultados quantitativos. Da dupla exposição pura e simples passou-se à dupla-exposição com dupla referência que permite efectuar cálculos de fase por modulação temporal [27].

No que se refere ao método de solicitação da estrutura, a utilização de sistemas electromecânicos ou baseados em piezoeléctricos substitui com vantagem a utilização de pêndulos. Com estes sistemas é possível registar de uma forma repetitiva e mais fiável os primeiros instantes dos choques e acompanhar a sua evolução [28,29].

As técnicas de Interferometria de *Speckle*, (Holografia-TV) mesmo estando disponíveis desde meados da década de 70, apenas são referidas no estudo da propagação de ondas de flexão em placas em 1996 e com o objectivo de detectar fissuras [28].

Com efeito, o estudo quantificado de fenómenos transientes, necessitando de fontes de luz pulsadas, necessita de meios de registo electrónico, ou de montagens com dupla referência difíceis de utilizar. Como só a partir de meados da década de 90 ficaram disponíveis meios de registo electrónico com capacidade de serem utilizados nesta aplicação só recentemente se retomou a investigação nestas técnicas. Os projectos

Brite-Euram PDHS e VIP são disso exemplo e demonstram o interesse da indústria e o empenho dos centros de investigação em desenvolver ferramentas de medida para este tipo de estudos.

Uma característica de todas estas experiências de Interferometria Holográfica e de *Speckle* é a excelente qualidade dos resultados obtidos que permite uma fácil interpretação dos fenómenos. Os sistemas de processamento de imagem permitem processar e interpretar a enorme quantidade de informação que fica disponível em cada medição. Desta forma é possível obter resultados experimentais para validar novos modelos numéricos, ajustando as condições fronteira, as condições de carregamento, ou a discretização do modelo. Um exemplo do que acaba de ser dito pode encontrar-se na publicação de Fallstrom [30] que descreve a interacção por impacto entre dois corpos rígidos.

Neste trabalho foram utilizadas as técnicas de Holografia-TV com uma só referência e uma portadora espacial nas franjas primárias para caracterizar a propagação de ondas de flexão geradas por um impacto de um corpo rígido com a superfície de uma placa. A energia introduzida pela solicitação pode ser calculada se for conhecida a forma da onda gerada. A caracterização da onda foi obtida através da sua medição com um corpo cilíndrico. Este corpo sofria um impacto numa das extremidades e tinha a outra extremidade em contacto com a placa. Na figura 6.46 pode ver-se o resultado de uma medição no tempo do sinal proveniente do extensómetro, este sinal está relacionado com a força exercida sobre a barra e pode ser utilizado na simulação numérica do comportamento da placa.

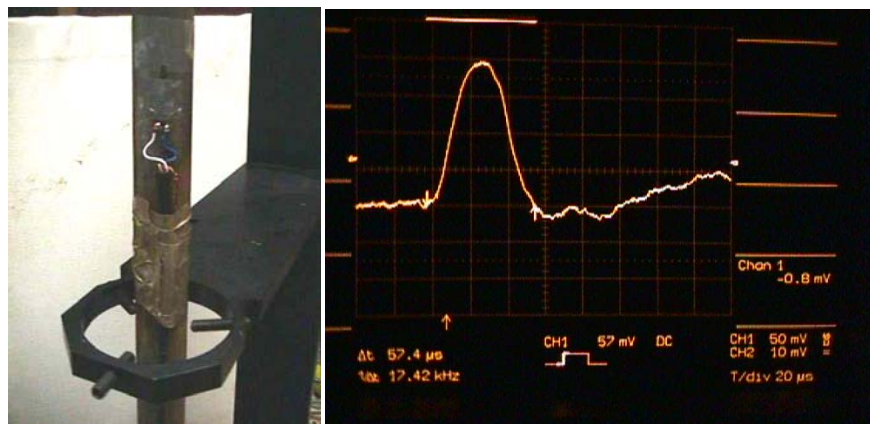


Figura 6.46 – a) Medição experimental da deformação axial sofrida por uma barra cilíndrica após impacto com um corpo rígido. b) Sinal proveniente do extensómetro.

Como fonte de luz coerente foi utilizado um *laser* de Rubi LUMONICS HSL2 fornecendo cerca de 800 mJ por impulso a 694 nm e operado em duplo impulso. Na figura 6.47 mostra-se o sistema óptico formador de imagem e a placa de aço utilizada neste estudo. Trata-se de uma placa quadrada com 30 cm de lado e fixa nos vértices.

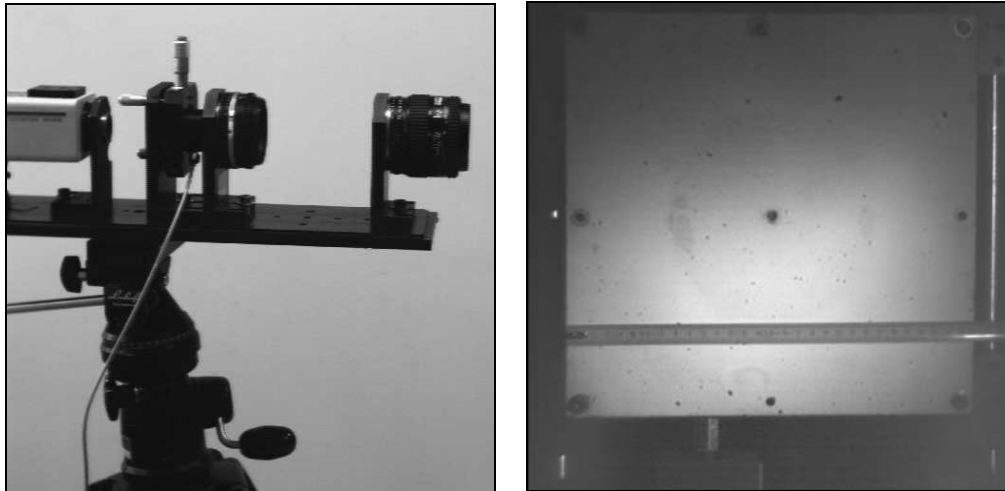


Figura 6.47 – Imagens do sistema interferométrico formador de imagem e da placa metálica em estudo.

Na figura 6.48 apresenta-se um mapa de fase obtido sem qualquer excitação da placa. Como pode observar-se trata-se de uma distribuição uniforme onde se evidencia que, por limitação dos *buffers* da placa de imagem, MATROX PULSAR, apenas 800 linhas têm informação válida. Na operação em dupla exposição assíncrona aproximadamente 200 linhas da parte inferior da imagem correspondem a ruído.

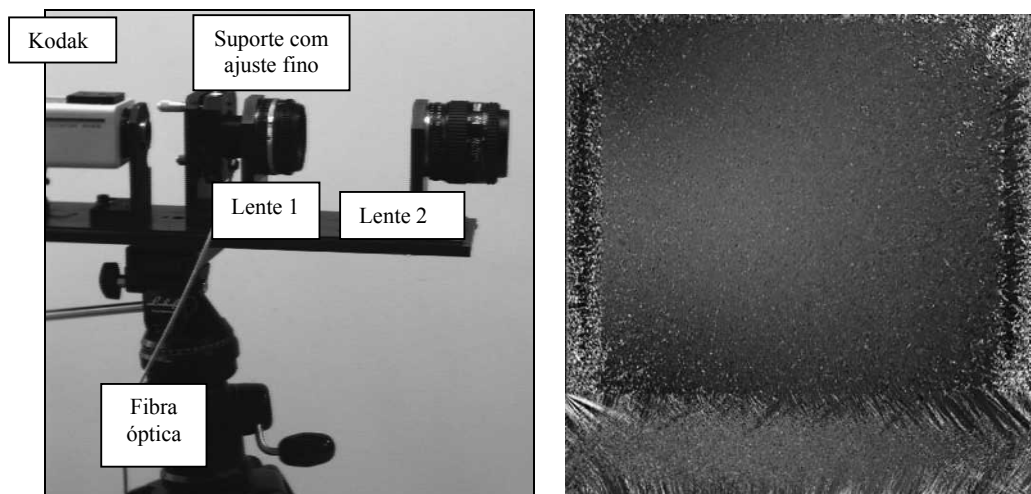


Figura 6.48 – Imagem do sistema interferométrico formador de imagem e mapa de fase obtido por dupla-exposição onde é possível observar as linhas (200) que não contêm informação.

O esquema que descreve a montagem experimental está representado na figura 6.49. Este esquema é semelhante ao utilizado na análise modal do altifalante. O objecto é iluminado por intermédio de um espelho convexo e fornece a referência do interferómetro através de uma fibra óptica monomodo.

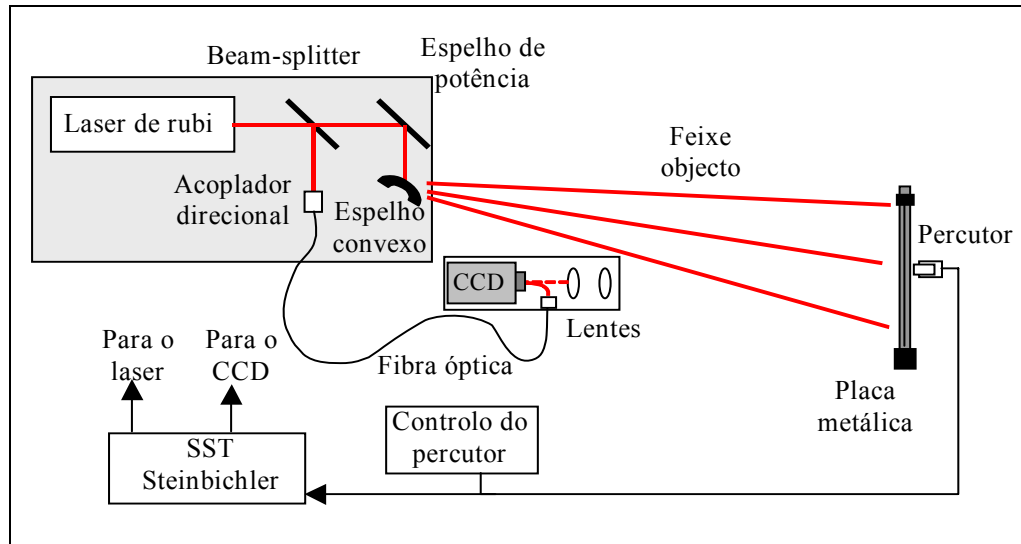


Figura 6.49 – Esquema de montagem experimental para o estudo da propagação de ondas de tensão em placa metálica.

Para além dos componentes usuais na realização da dupla-exposição, já descritos anteriormente, é adicionado um componente para realização do impacto. O fenómeno transiente é gerado através do impacto de um êmbolo de metal na parte anterior da placa. Este sistema de carga é accionado por um sistema percutor electromecânico. O mecanismo é controlado electricamente e os sinais utilizados servem ainda de *trigger* para o sistema de sincronização temporal. Para geração dos sinais de atraso, necessários ao controlo de todo o sistema de medida, foi utilizado o já referido SST Steinbichler. Na fase inicial de ajuste do sistema o sinal de sincronismo foi gerado por um acelerómetro colocado na placa. Neste caso, uma pancada na placa induz um sinal no acelerómetro que faz o *trigger* de todo o sistema através do SST. O ajuste do nível de *trigger* depende da intensidade da pancada. Apesar da sua simplicidade este sistema de *trigger* não permite registar o início do fenómeno pelo que foi apenas utilizado na fase de ajuste do sistema. Estas primeiras medições foram ainda utilizadas na afinação dos programas de cálculo de fase.

O sincronismo geral com um sistema percutor electromecânico permite detectar os primeiros instantes do choque. Sendo o disparo do percutor realizado por um sinal eléctrico, anterior ao impacto, este sinal pode também ser utilizado para *trigger* do SST. No sistema utilizado o atraso entre o envio do sinal pelo controlador do percutor e o impacto era fixo e igual a 5 ms.

Para a fixação do sistema de excitação à placa foi utilizada uma ventosa. Este modo de fixação permite obter uma grande repetibilidade nas medidas temporais. O sistema de accionamento do percutor permite ainda controlar a energia do choque através da variação da diferença de potencial aplicada aos condensadores e da carga acumulada nestes.

O acelerómetro utilizado no ajuste do sistema permitiu controlar a colocação do impacto entre o par de impulsos do *laser*. Na figura 6.50 está representado o diagrama de blocos do sistema de geração de sinais de

sincronismo. Neste esquema pode verificar-se que os sinais de disparo do *laser* e o sinal obtido do acelerómetro são registados num osciloscópio para visualização da colocação do impacto.

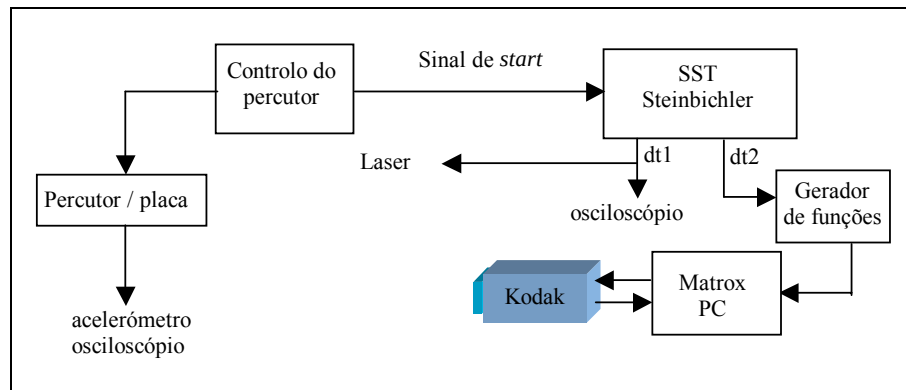


Figura 6.50 – Diagrama de blocos de controlo temporal câmara/laser/impacto.

O diagrama temporal dos sinais intervenientes nestes ensaios é descrito na figura 6.51. Deve referir-se que o êmbolo embate na placa com um atraso de 5 ms em relação ao momento em que o botão de disparo na unidade de controlo é accionado. Ao dar-se o arranque do sistema de excitação, o controlo deste gera um sinal de *start* no SST. Este, por sua vez, gera dois sinais de atraso $dt1$, para o *laser* de rubi e $dt2$ para a placa Matrox para que os dois impulsos *laser* sejam disparados durante as exposições da câmara. Desta forma é ainda assegurado que os padrões de *speckle* são registados antes e após o impacto do êmbolo na estrutura.

Neste caso, para um intervalo de tempo entre impulsos de 10 μs : $dt1 = 5000 - 1150 = 3850 \mu\text{s}$.

$$dt2 = 5000 - 37 - 253 = 4710 \mu\text{s}$$

Desta forma é possível determinar o campo de deslocamentos da estrutura em relação à situação de repouso. Sendo o fenómeno não destrutivo é possível repeti-lo várias vezes para diferentes intervalos de tempo entre o impacto e o 2º impulso. Pode assim obter-se a evolução temporal da propagação da onda desde que se mantenha constante a excitação.

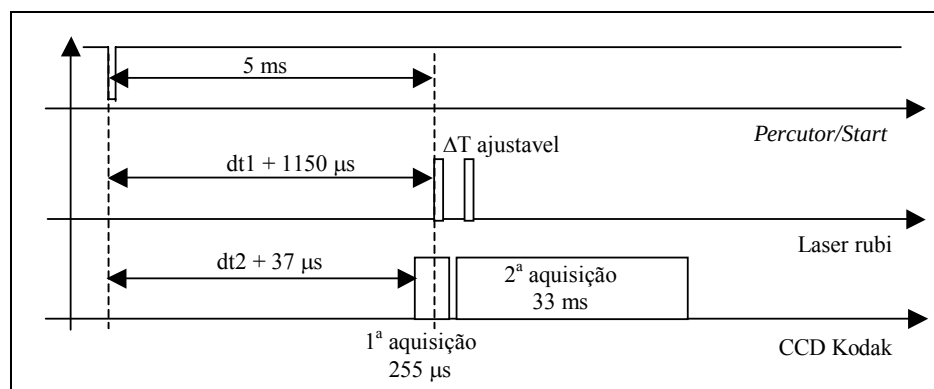


Figura 6.51 – Diagrama temporal de sincronização aquisição vídeo/impacto/impulsos laser.

Tal como nas aplicações anteriores este estudo experimental registou padrões de *speckle* através da técnica de dupla-exposição com introdução de uma frequência portadora espacial nas franjas primárias. Esta técnica, já descrita anteriormente, é aqui lembrada através do esquema da figura 6.52.

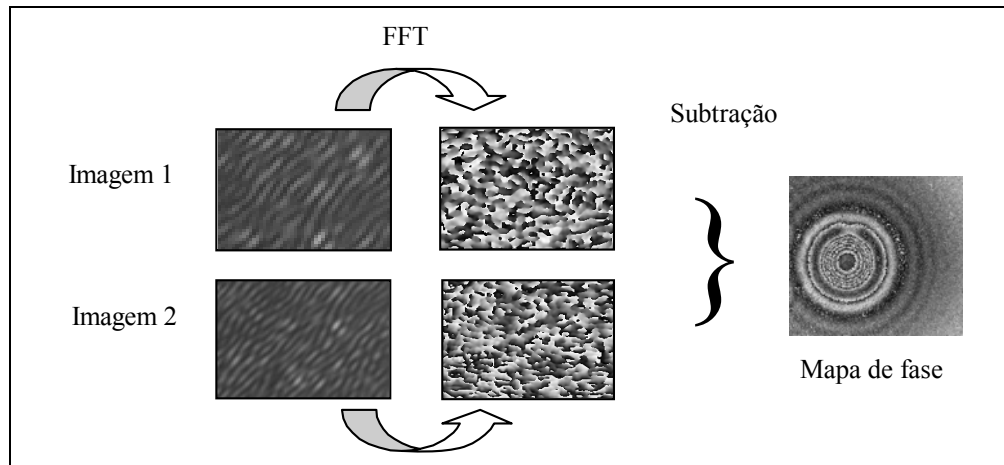


Figura 6.52 – Obtenção de um mapa de fase através da utilização de algoritmos de FFT.

Em instantes diferentes da estimulação do objecto são registados dois padrões de *speckle*. Estes padrões contêm franjas de interferência primárias nos grãos de *speckle* que constituem a portadora espacial que permite obter a fase de cada grão de *speckle*. Estas duas distribuições de fase são depois subtraídas para dar origem ao mapa de fase referente às diferenças entre os dois estados de carregamento do objecto.

Os resultados experimentais são apresentados sob a forma de mapas de fase, mapas de deslocamentos e perspectivas tridimensionais. Esta segunda forma de representação - *desmodulação dos mapas de fase e posterior cálculo dos deslocamentos através da determinação da interfranja* - permite observar uma distribuição contínua dos deslocamentos. Numa representação pseudo-3D, uma perspectiva tridimensional pode ser obtida associando o valor da intensidade ao deslocamento no ponto (x,y) do objecto. As figuras seguintes de 6.53 a 6.58, apresentam uma sequência de medidas obtidas num intervalo de tempo que varia entre 20 μs e 800 μs após o impacto do percutor na placa.

A figura 6.53 representa o mapa de fase e o mapa de deslocamentos da placa 20 μs após o impacto. É nesta situação que os deslocamentos são mais importantes, regista-se um deslocamento máximo de cerca de 2 μm na zona de impacto, com um elevado gradiente na frente de propagação. A primeira imagem apresenta as franjas devidas ao deslocamento, concentradas em torno do ponto de impacto do percutor, e uma grande quantidade de franjas próximas da frente de propagação. A imagem que representa a desmodulação do mapa de fase, 20 μs após o choque, apresenta, por isso, uma quantidade grande de erros na zona de maior gradiente. Nesta zona existe uma densidade de franjas demasiado elevada para ser resolvida pelo CCD. De qualquer forma é nítido que na zona do impacto, existe um afundamento de 0.88 μm na zona de impacto e

um afundamento, de sentido contrário, de $1.03 \mu\text{m}$ na frente de propagação da onda de choque, como pode comprovar-se pela escala representada do lado direito da imagem.

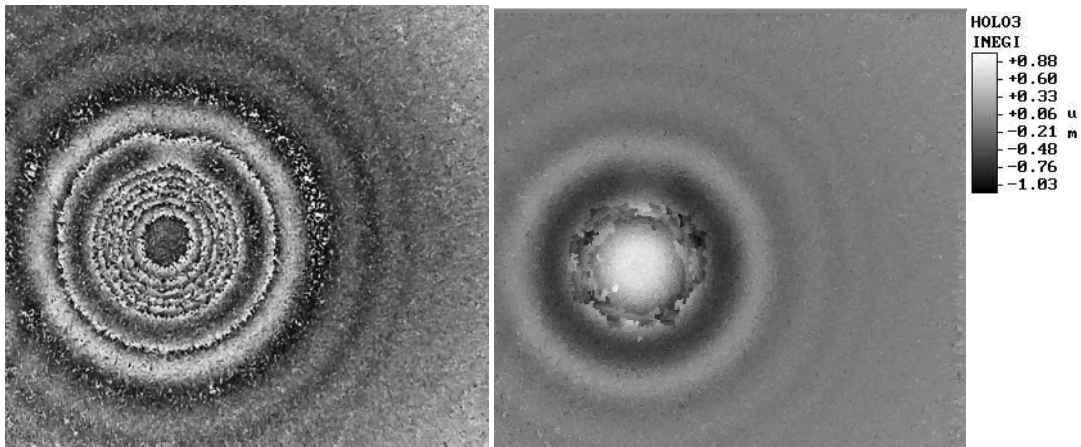


Figura 6.53 – Mapa de fase e de deslocamentos obtido $20 \mu\text{s}$ após impacto.

Na figura 6.54 está representado o mapa de fase $100 \mu\text{s}$ após o impacto do percutor na placa. Aqui, a onda de flexão originada pelo choque já quase alcançou toda a placa. Nesta situação verifica-se que a densidade energética na zona de impacto diminuiu. Esta imagem de fase é mais fácil de desmodular pois as franjas estão já espalhadas por toda a imagem e não concentradas em torno do ponto de impacto. A imagem desmodulada do mapa de fase $100 \mu\text{s}$ após o choque já não apresenta erros pois sendo o gradiente menor corresponde-lhe uma menor densidade de franjas. Para além disso a qualidade da imagem permite revelar o início das ondas de reflexão, uma das quais está a passar pela zona inicial do impacto. Nesta imagem, o pico tem uma amplitude de $0.77 \mu\text{m}$ em relação ao extremo da placa e o afundamento provocado é de $0.51 \mu\text{m}$.

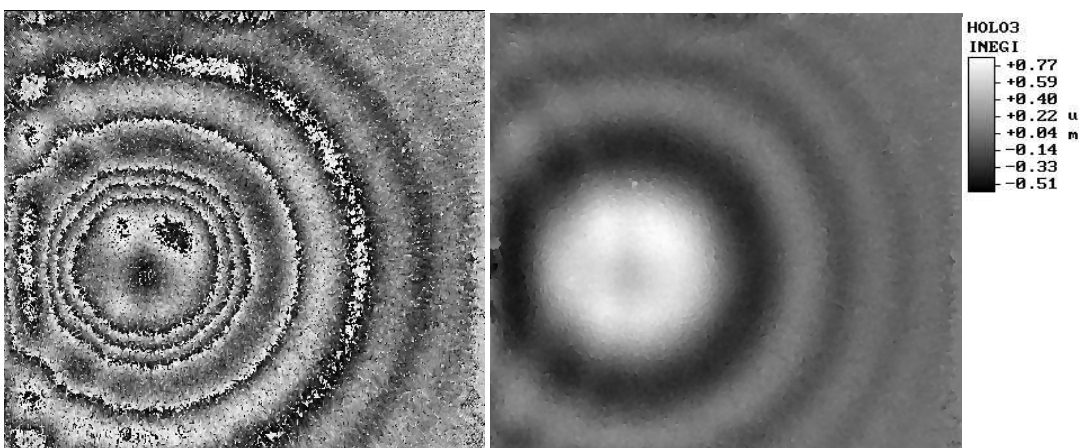


Figura 6.54 - Mapa de fase e de deslocamentos obtido $100 \mu\text{s}$ após impacto.

As duas imagens seguintes, figuras 6.55 e 6.56, mostram o desvanecimento do impacto inicial e a propagação das ondas de choque a toda a placa com as sucessivas reflexões. Assim, cada vez mais os picos e

os afundamentos são menores tornando-se a deformação da placa mais homogênea à medida que o instante de aquisição das imagens passa de 140 μs para 200 μs .

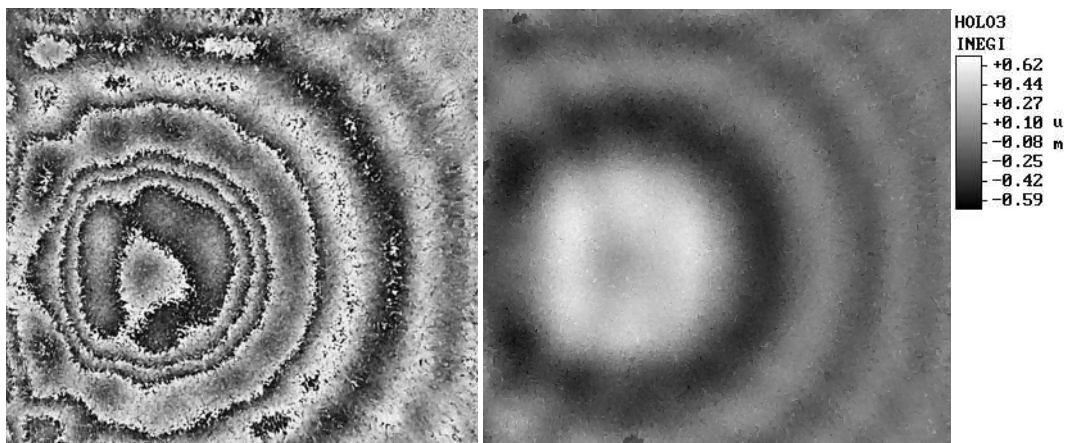


Figura 6.55 - Mapa de fase e de deslocamentos obtido 140 μs após impacto.

Nesta série de imagens são mais visíveis as ondas de reflexão e uma maior uniformidade de deformações começa a observar-se na placa. É no registo de 140 μs que se observam as primeiras ondas de reflexão originadas pelos bordos horizontais da placa. No registo de 200 μs , as reflexões dão-se em todos os bordos da placa e observa-se, por isso, menores amplitudes de deslocamentos.

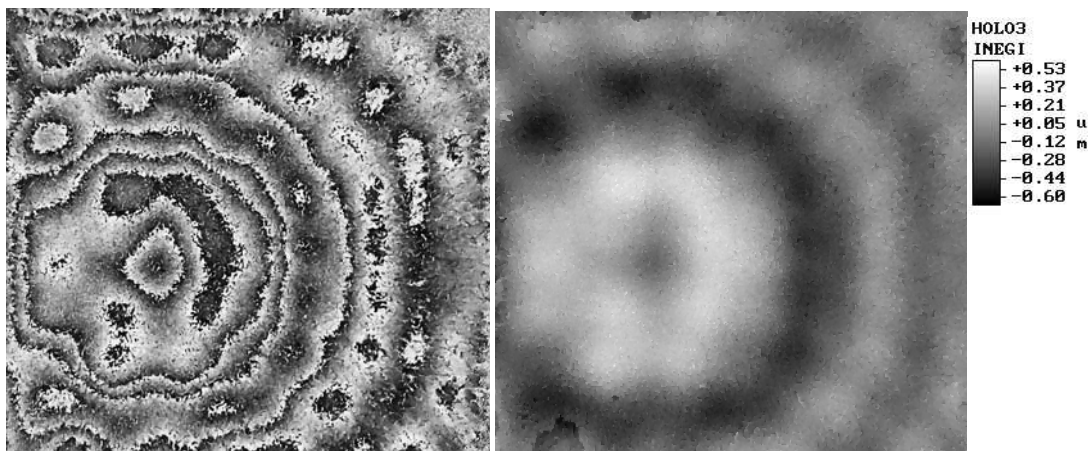


Figura 6.56 - Mapa de fase e de deslocamentos obtido 200 μs após impacto.

As duas últimas figuras, figura 6.57 e figura 6.58, desta sequência de registos representam os mapas de fase da placa 510 μs e 800 μs após o choque. Nestas imagens pode observar-se que o gradiente de deslocamentos devido ao impacto está cada vez mais diluído. A imagem obtida 800 μs após o choque revela que a onda de flexão já foi totalmente dissolvida nas sucessivas reflexões.

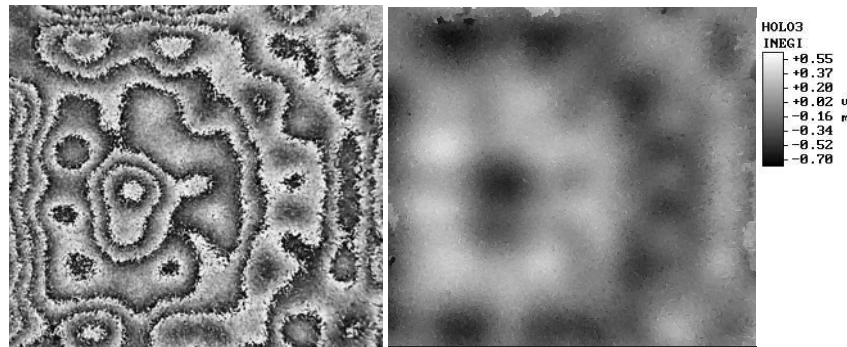


Figura 6.57 - Mapa de fase e de deslocamentos obtido 510 μ s após impacto.

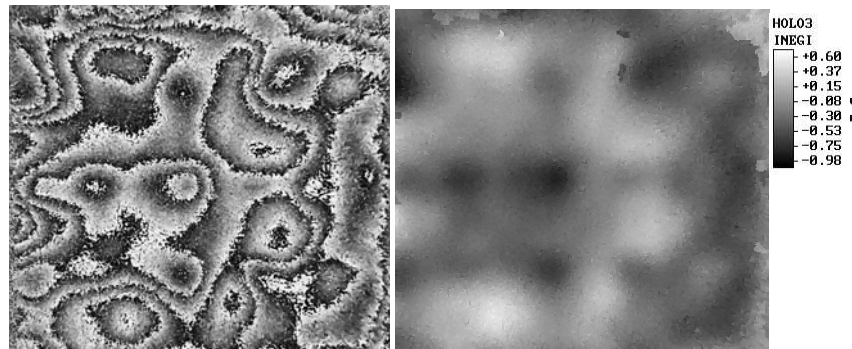


Figura 6.58 - Mapa de fase e de deslocamentos obtido 800 μ s após impacto.

Na figura 6.59 representam-se de duas formas diferentes a deformação da placa metálica 20 μ s após o choque. Na primeira imagem fez-se uma sobreposição do deslocamento em pseudo-cores com uma imagem vídeo da placa e, na segunda imagem representa-se um corte de uma secção horizontal da placa no mesmo instante. A secção escolhida foi uma secção próxima do ponto de impacto. Desta última representação é possível verificar que a informação disponível pode ser derivada de forma a aceder aos campos de tensões correspondentes a esta configuração da estrutura.

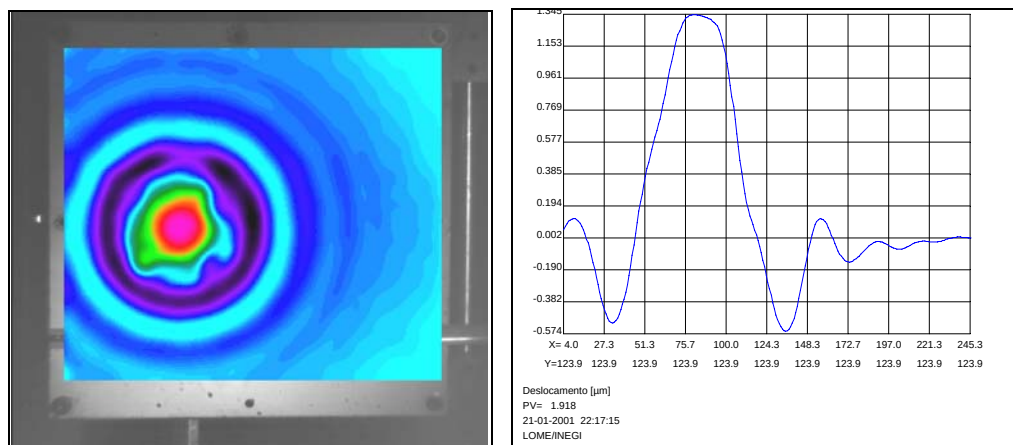


Figura 6.59 – Caracterização da onda no instante 20 μ s após o choque por pseudo-cores e por um corte de uma secção horizontal próxima do ponto de impacto.

A figura 6.60 pretende mostrar de uma forma mais clara como é feita a propagação da onda de choque ao longo de toda a extensão da placa. Nesta representação recorreu-se a um algoritmo de representação pseudo-3D que torna o fenómeno mais compreensível.

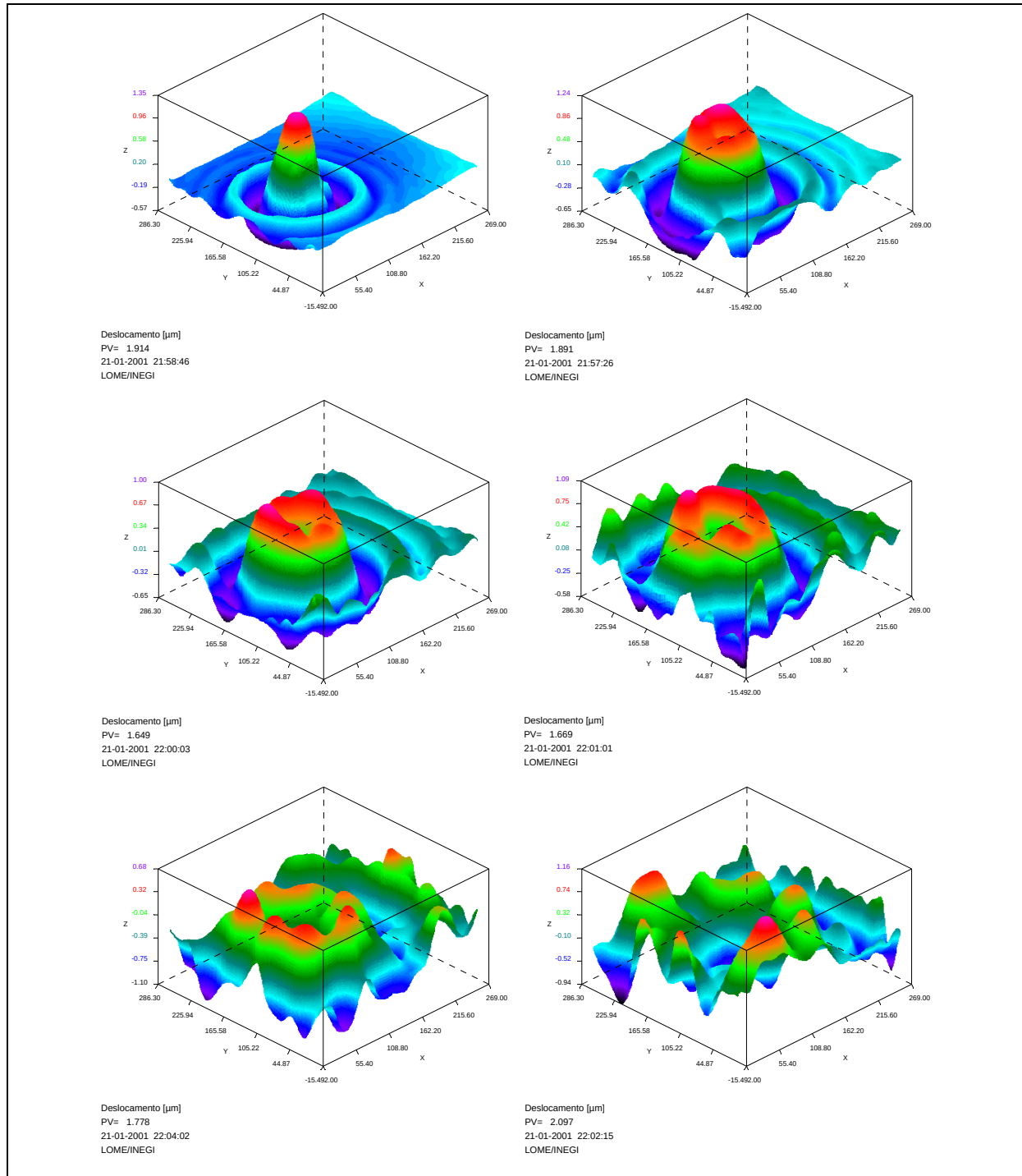


Figura 6.60 – Representação pseudo 3D da evolução da propagação da onda de choque de 20 μs a 510 μs .

Estes resultados obtidos estão de acordo, de uma forma qualitativa, com anteriores resultados obtidos por métodos holográficos. Devido à dispersão do material a amplitude radial do impulso varia no tempo. Para tempos elevados os padrões de deslocamentos podem ser vistos como combinações de modos naturais de vibração da placa [31].

Um detalhe importante e que é verificado também por outros autores é a inversão de fase do pico central após a obtenção do valor de máxima amplitude (correspondente ao final do impacto de duração finita).

Na verdade, a imagem obtida para um intervalo de tempo de 100 μ s apresenta um vale onde anteriormente se encontrava o pico do impacto, ver imagem referente a 20 μ s.

Este resultado apesar de não ter uma explicação trivial pode ser devido a dois factores:

- Após o aumento da amplitude do pico de deslocamento durante o tempo de impacto essa amplitude mantém-se a valores quase constantes até à existência de reflexões nos bordos. A existência do vale pode ter origem nessas ondas de reflexão criadas,
- O impacto cria na zona de contacto tensões mecânicas que originam uma deformação adicional [25].

Os resultados obtidos neste estudo revelam as grandes vantagens deste tipo de medição global. Através de fenómenos repetitivos é possível obter um registo global em vários instantes da propagação da onda. Os campos de deslocamentos obtidos, de elevada resolução, podem ainda ser utilizados na determinação de parâmetros materiais [32,33]. Na realidade, a diferenciação do campo de deslocamentos permite obter uma relação entre o declive, no ponto de inflexão do pico de impacto, e um parâmetro D, relacionado com o módulo de elasticidade (E), a espessura da placa (h) o coeficiente de Poisson (ν) [24].

$$\left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{inf l} = const \cdot \frac{I}{D^{3/4} \cdot \rho^{1/4} \cdot \sqrt{t}} \quad (6.14)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (6.15)$$

De referir que os valores assim determinados são válidos para instantes em que a onda se propaga sem que existam reflexões. Considera-se então, para estes instantes, que a placa é infinita.

Da diferenciação dos campos de deslocamentos representados é possível obter as distribuições de tensão correspondentes a cada instante da propagação. Sendo a diferenciação espacial dos mapas de deslocamentos um processo amplificador do ruído existente nos deslocamentos, este cálculo comporta algumas dificuldades não totalmente resolvidas e que não foram objecto de estudo neste trabalho. Contudo a obtenção das tensões durante a propagação da onda constituem a maior vantagem destas técnicas no estudo de fenómenos transitórios.

Na figura 6.61 apresentam-se duas imagens relativas à diferenciação horizontal e vertical do campo de deslocamentos obtido 20 μ s após o choque.

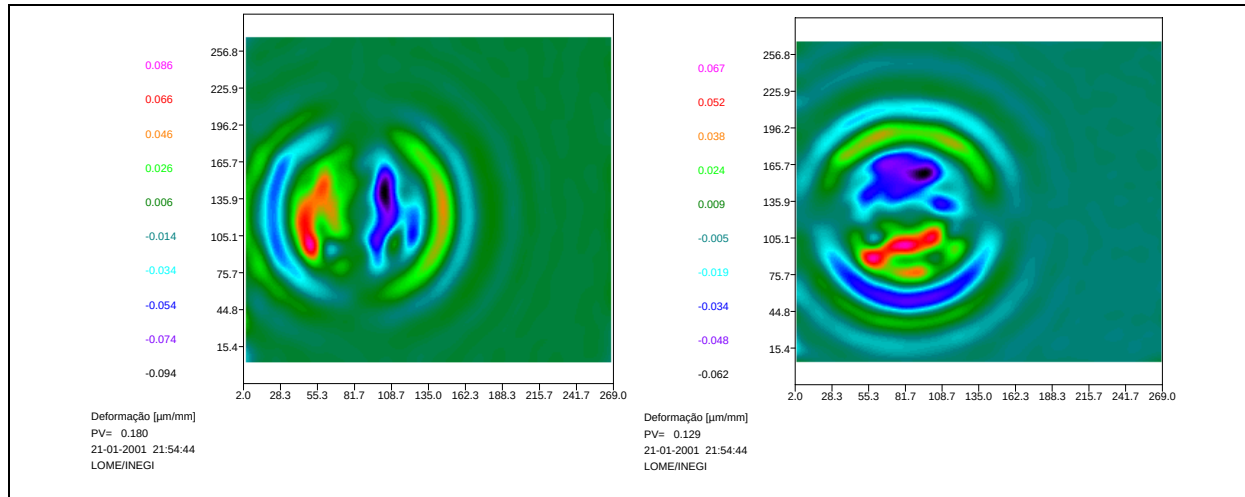


Figura 6.61 – Campo de deformações obtido por diferenciação horizontal e vertical do campo de deslocamentos.

Do que atrás foi dito pode constatar-se que se está em presença de técnicas de Mecânica Experimental muito poderosas no que se refere às suas potencialidades: sem contacto, de carácter global e de elevada resolução. As técnicas de registo assíncrono e os sistema de processamento de imagem permitem aceder ao comportamento, no tempo, das estruturas quando solicitadas por fenómenos transientes. Por último, deve ainda referir-se a possibilidade de derivação dos campos de deslocamento (derivadas da velocidade dado que os registos são determinados entre dois instantes) permitirão prosseguir para o cálculo das tensões geradas durante a propagação.

Referências

- [1] R.Powell and K.Stetson, “Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction”, *J.Opt.Soc.Am*, Vol. 55, pág. 1593-1598, 1965.
- [2] C. Aleksoff, “Time-average holography extended”, *Applied Physics Letters*, Vol. 14, pag. 23-24, 1969.
- [3] C. Aleksoff, “Temporally modulated holography”, *Applied Optics*, Vol. 10, pag. 1329-1341, 1971
- [4] A. Slettemoen, “First-order statistics of displayed speckle patterns in electronic speckle pattern interferometry”, *J. Opt. Soc. Am*, Vol. 71, pag. 474-482, 1981.
- [5] O. Lokberg, G. Slettemoen, “Basic electronic speckle pattern interferometry”, *Applied Optics and optical engineering*, Vol. X, Academic Press, Inc. (Shannon, R.R & Wyant J.C. Ed.), pag; 455-504, 1987.
- [6] G. Slettemoen, “Electronic speckle pattern interferometric system based on a speckle reference beam”, *Applied Optics*, Vol. 19, pag. 616-623, 1980.
- [7] E. Vikhagen, “Vibration measurement using phase shifting TV-Holography and digital image processing”, *Optics Communications*, Vol. 69, pag. 214-218, 1989.
- [8] M.A.P. Vaz, “Interferometria Laser e Métodos Híbridos em Mecânica Experimental”, *Tese de Doutorado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.
- [9] C. Aleksoff, “Temporal modulation techniques”, in *Holographic Non-destructive testing* (Ed. R. Erf) Academic Press, Inc. New York, 1984.
- [10] VIP-Vibration Intensity Processing by Full-field Laser Multipulse Technique, Relatório final, Projecto BRITE EURAM, BE 95-1147.
- [11] H. Lopes, “Estudo do Fluxo de Energia Vibratória em Vigas e Placas” Tese de mestrado, FEUP, 2001
- [12] J. Petzing & J. Tyrer, “In-plane pulsed carrier speckle interferometry for structural surface intensity measurement”, *Journal of Modern Optics*, Vol. 46, pag. 1947-1959, 1999.
- [13] P. Saunders & D. Kane, “Calculation of spectral linewidths from measured fringe visibility using a Fabry-Perot interferometer”, *Journal of Modern Optics*, Vol. 35, pag; 1801-1812, 1988.
- [14] PDHS-Pulsed Digital Holography and Shearography, Relatório final, Projecto BRITE EURAM, BE 95-1147
- [15] K. Hunecke, “Jet engines-Fundamentals of Theory, Design and Operation”, Airline Ed, UK, 1997.
- [16] P. Smiegelski, “Holographie industrielle”, Ed. Teknea, 1994
- [17] Manual Algor v 12, Computing Technologies Inc,
- [18] K. Creath, “Phase measurement interferometry techniques”, in *Progress in Optics*, Vol. XXVI, Ed. E. Wolf (Elsevier Publishers), pag. 349-393, 1988.
- [19] L.Ek & K.Biedermann, “Fringe Contrast in a system for hologram interferometry with low resolution imaging devices”, *Jorn. Of Physics E:Scientific Instruments*, Vol.8, pag. 691-696, 1975.
- [20] J. Monteiro, J. Chousal, M. Vaz, "Vibration Analysis by Laser Interferometry Techniques", *International workshop on Aerospace and Powered Lift Technologies*, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 7-9 Julho 1997.

- [21] X. Bohineust, V. Linet & F. Dupuy, “Dynamic analysis of structures by holographic interferometry: strategy and development for vehicle”, *3rd French-German congress on applications of holography*, Saint-Louis, France, 20-22 Novembro, 1991.
- [22] R. Aprahamian, D. Evensen, J. Mixson and J. Wright, “Application of pulsed holographic interferometry to the measurement of propagating transverse waves in beams”, *Experimental Mechanics*, pag. 309-314, July, 1971.
- [23] S. Urgela, “Grading of wooden plates for musical instrument making by means of holographic interferometry”, *Optical Engineering*, Vol. 37, pag. 2108-2118, 1998.
- [24] K. Fallstrom, “Material parameters and defects in anisotropic plates determined by holographic interferometry”, *Tese de doutoramento*, Universidade de Lulea, Suécia, 1990.
- [25] K. Olofsson K.-E. Fallstrom & P. Palágyi, “Laser generated and recorded transient bending waves in composite tubes”, *Experimental Mechanics*, Vol. 36, pag. 224-231, 1996.
- [26] L. Crawforth. et al., “Application of pulsed laser holographic interferometry to the study of magnetic disk drive component motions”, in *Proceedings of the 1990 Fall Conference of the SEM*, Bethel, 404-412, 1990.
- [27] G. Lai & T. Yatagai, “Dual-reference holographic interferometry with a double pulsed laser”, *Applied Optics*, Vol. 27, pag. 3855-3858, 1988.
- [28] J. Blanco-Garcia et al., “Crack detection by TV-Holography: continuos and pulsed techniques”, *Proceedings of SPIE*, Vol. 2730, pag. 101-105, 1996.
- [29] A. Fernández et al., “Transient bending waves analysis by Fourier evaluation of single pulsed TV-Holography fringe patterns”, *Proceedings of SPIE*, Vol. 3098, pag. 575581, 1997.
- [30] K. Fallstrom, H. Gustavsson, N. Molin & A. Wahlin, “Transient bending waves in plates studied by hologram interferometry”, *Experimental Mechanics*, pag. 378-387, December 1989.
- [31] R. Clough; J. Penzien; “Dynamics of Structures” *2nd Edition; McGraw-Hill, Civil Eng Séries*, 1993
- [32] R. Hofling, “Combined theoretical and experimental methods in material mechanics”, *Proceedings of Fringes’97*, Bremen, Germany, 1997.
- [33] T. Judge, C. Quan & P. Bryanston-Cross, “Holographic deformation measurements by Fourier transform technique with automatic phase unwrapping”, *Optical Engineering*, Vol. 31, pag. 533-537, 1992.

CAPÍTULO 7

APLICAÇÕES AO CONTROLO NÃO-DESTRUTIVO

7.1 – Introdução	7.2
7.2 – Sistemas de <i>Shearography</i> desenvolvidos	7.6
7.2.1 – <i>Shearography</i> de Michelson	7.6
7.2.2 – <i>Shearography</i> de Mach-Zehnder	7.10
7.3 – Métodos de solicitação	7.13
7.3.1 – Métodos de solicitação clássicos	7.14
7.3.2 – Solicitação por micro-ondas	7.16
7.4 – Aplicações aeronáuticas	7.20
7.4.1 – Sistemas comerciais	7.20
7.4.2 – Detecção de defeitos	7.23
7.4.3 – Ensaios em estaleiro	7.27
7.4.4 – Redacção de um “Procedimento de inspecção”	7.32
Referências	7.41

Os métodos de Controlo Não-Destrutivo (CND) têm vindo a adquirir uma importância cada vez maior na indústria, quer no apoio à fabricação, quer ao nível da manutenção e inspecção. No sector aeroespacial o CND é um processo vital para assegurar a integridade estrutural dos componentes. Desta forma se garante a segurança das pessoas bem como o seu conforto.

Se as primeiras aplicações da Interferometria de Speckle ao CND, através da técnica de shearography, demoraram algum tempo a ser implementadas e validadas, a última década revelou-se profícua em termos de novas aplicações. Para isto se ter tornado realidade vários factores, para além dos tecnológicos, foram fundamentais:

- Avanços nas técnicas de interpretação das franjas;
- Aumento da formação sobre técnicas ópticas na indústria;
- Validação da shearography na indústria, (ex. NTM Concorde) com a consequente necessidade de formação e certificação dos agentes técnicos.

A shearography oferece inúmeras vantagens em relação às técnicas clássicas de inspecção. Permite reduzir o tempo de inspecção de uma ordem de grandeza, pode ser aplicada sobre geometrias complexas e não requer nenhum contacto com o componente. Estas vantagens são ainda mais evidentes nas novas gerações de aeronaves que possuem estruturas de geometria complexa construídas em materiais compósitos.

Este capítulo identifica o estado actual da utilização da shearography na indústria aeroespacial e propõe soluções para ultrapassar alguns problemas que limitam uma mais ampla aplicação da técnica. Por fim são identificadas as actuais áreas de aplicação do método no que se refere, sobretudo, ao sector aeroespacial onde o autor deste trabalho adquiriu a sua experiência.

7.1 – INTRODUÇÃO

O potencial das técnicas de Interferometria Holográfica em aplicações de CND tem sido avaliado desde o final da década de sessenta [1]. Powel e Stetson verificaram que a Interferometria Holográfica por dupla-exposição poderia ser utilizada para observar defeitos numa estrutura se esta fosse convenientemente solicitada [2]. Contudo, a sua utilização industrial foi reduzida e esteve sempre limitada por dois aspectos fundamentais:

- O processamento químico dos resultados
- A sensibilidade às perturbações ambientais.

O primeiro obstáculo foi vencido no início dos anos setenta com o registo electrónico dos padrões interferométricos e o aparecimento das técnicas de Holografia-TV [3]. Contudo a aplicabilidade destas

técnicas ao CND são limitadas devido não só à extrema sensibilidade da técnica, que facilmente pode levar à descorrelação do *speckle*, mas também porque os deslocamentos de corpo rígido conduzem a um padrão de franjas que se adicionam às provocadas pelo defeito dificultando a sua detecção.

A utilização de lasers pulsados com registo de interferogramas em CCD permite eliminar a sensibilidade desta técnica às perturbações exteriores. Como já foi referido, nesta técnica a obtenção de mapas de fase é obtida através de apenas um interferograma registado durante alguns micro-segundos. Na figura 7.1 pode ver-se o resultado da detecção de dois defeitos numa placa *sandwich* com peles de fibra de vidro e núcleo em Nomex obtida com um sistema de Holografia-TV descrito no capítulo 5. Para a estimulação do defeito foi utilizada uma solicitação por impacto pelo que são perfeitamente visíveis as frentes de onda resultantes da propagação da flexão induzida. Neste caso a sobreposição das franjas geradas por deslocamentos de corpo rígido dificulta a detecção dos gradientes localizados devidos aos defeitos. Defeitos de pequena dimensão são frequentemente mascarados pelos padrões de franjas globais.

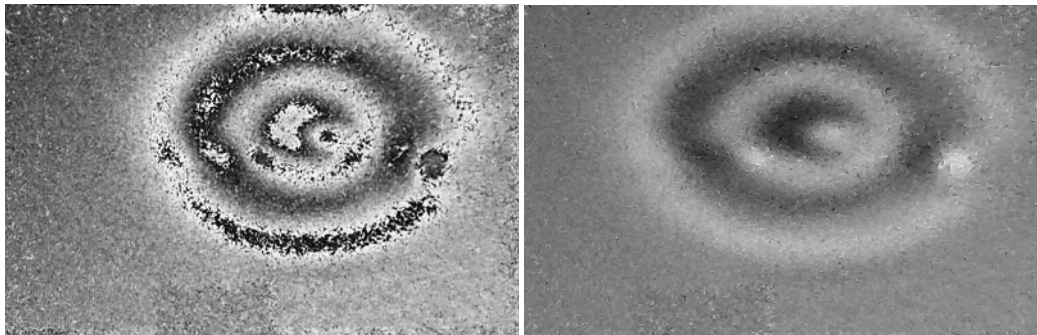


Figura 7.1 – Mapa de fase obtido por Holografia-TV.

O obstáculo à detecção de defeitos só no início dos anos oitenta foi ultrapassado, quando Hung utilizou para este efeito as técnicas de *Shearography*. Esta constatação permitiu que os interferómetros de *shear* fossem adaptados ao **Controlo Não-Destrutivo (CND)** evoluindo até se tornarem ferramentas portáteis que respeitam todos os requisitos de segurança que o emprego de fontes de luz *laser* implica. Desde essa altura que as aplicações das técnicas de *Shearography* ao CND de materiais e estruturas têm vindo a aumentar.

Depois da aplicação do interferómetro proposto por Hung ao CND foi com alguma naturalidade que se retomou a utilização da técnica proposta por Leendertz, o interferómetro de Michelson, para a aplicar ao estudo do comportamento estrutural de componentes [4]. Além destas duas montagens ópticas o autor desenvolveu também uma montagem de *Shearography* baseada no interferómetro de Mach-Zehnder para a detecção de defeitos [5]. Este trabalho envolve alguma originalidade pois só uma referência relativa à *Shearography* com este interferómetro, datada de 1997, foi encontrada e fora do contexto do CND [6].

O princípio da aplicação da *Shearography* ao CND baseia-se no facto de os componentes com falhas apresentarem deformações diferentes, na gama dos micrómetros, dos componentes sem danos. Estas deformações anormais podem ser classificadas como deformações típicas de componentes defeituosos.

A *Shearography* é um método de interferometria *laser* sensível ao gradiente do deslocamento de uma superfície na direcção fora-do-plano. Sob a acção de um carregamento ligeiro, a estrutura é deformada e a presença de defeitos é revelada através de singularidades locais do campo de deformação observado à superfície.

A importância da *Shearography* no CND advém da sensibilidade da montagem à medida do gradiente de deslocamento. Os movimentos de corpo rígido do componente a ser testado influenciam de forma semelhante os dois percursos dos feixes que interferem, não alterando o padrão de franjas.

Os componentes básicos comuns a todos os sistemas de *Shearography* incluem um *laser*, uma câmara CCD, um sistema óptico e *hardware* de aquisição de imagem. Na figura 7.2 representa-se esquematicamente um desses sistemas adaptado a inspecções *in-situ*, com o sistema óptico e de iluminação incorporados no mesmo componente.

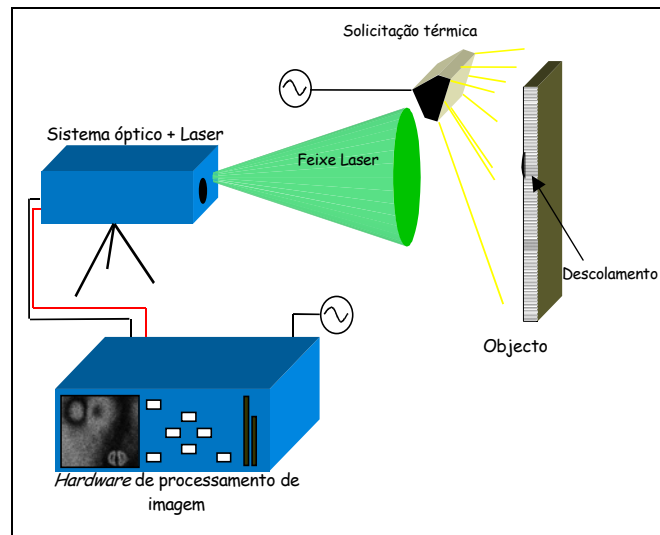


Figura 7.2 – Representação de um sistema de *shearography* adaptado a realizar inspecções *in-situ*.

As aplicações típicas da *Shearography* no CND são a detecção de descolamentos, delaminações devidas a impactos, fissuras, inclusão de líquidos e corrosão.

As principais vantagens da utilização desta técnica são:

- **Ausência de contacto**
- **Menor tempo de inspecção** (possibilidade de observar áreas de 1 m² de uma só vez).
- **Elevada resolução** (fracções de micrómetro são facilmente alcançadas).
- **Capacidade de realizar inspecções em tempo real e in-situ** (as imagens são gravadas e apresentadas à frequência vídeo (30 Hz NTSC ou 25 Hz CCIR).
- **Portabilidade do sistema** (sistemas de aproximadamente 6x6x9 cm³ podem ser construídos).
- **Diferentes tipos de defeitos estruturais podem ser detectados** independentemente da natureza da estrutura que pode ser um metal, um polímero, um elastómero ou um compósito.

Os sistemas de *Shearography* têm sido usados no CND em diferentes sectores: aeronáutica, espaço, marinha, reservatórios de pressão, inspecção de pneus,... .Exemplos de aplicações da *Shearography* no CND de estruturas podem ser encontrado em numerosas empresas do sector aeronáutico: Airbus, ATR, Boeing, BAE Systems, Eurocopter, Lockheed-Martin, Northrop-Grumman, Saab, Snecma.... No sector espacial, empresas como a Alcatel Space, a Astrium ou a EADS Launch Vehicles recorrem também a esta técnica na avaliação de novas estruturas. Os serviços de manutenção de várias companhias aéreas como a Air France, British Aerospace estão equipados com esta técnica e utilizam-na regularmente. A indústria de pneus (Bridgestone, Continental, Goodyear, Michelin,...) têm vindo a equipar-se com sistemas comerciais. Na verdade desde o início dos anos 90 que a FAA (*Federal Aviation Authorities*) considera a *Shearography* como um método de inspecção certificado para os pneus de aeronaves. O sector naval de compósitos (Ocea) e de reservatórios de pressão para a indústria petroquímica (Total-Fina e GDF) são dois sectores onde as inspecções não destrutivas através de métodos interferométricos também têm sido alvo de estudos de aplicabilidade.

O desenvolvimento actual da técnica baseia-se na resolução de três problemas que permitirão a sua utilização regular em ambientes instáveis:

- a) **Uniformidade da iluminação:** Os *lasers* usados em *Shearography* funcionam no modo transversal TEM₀₀ e produzem um feixe com um perfil de intensidade gaussiano. Consequentemente, mesmo quando uma superfície difunde a luz em todas as direcções de uma maneira uniforme (superfície Lambertiana) a imagem aparece mais clara no centro. Verifica-se também que os níveis de ruído são mais elevados nas zonas fracamente iluminadas. Assim, no registo de uma imagem de 8 bits (256 níveis de cinzento) um histograma da distribuição de níveis de cinzento na imagem fornece um valor médio de apenas 64 [7]. A resolução deste problema de gama dinâmica foi tratada no capítulo 3 onde se sugerem formas de alterar o perfil gaussiano da iluminação para obter igual modulação em todos os *pixels* do detector. Desta forma será possível obter informação sobre uma área maior.
- b) **Aquisição e processamento de imagem:** A obtenção de resultados quantitativos pela *Shearography* em ambientes instáveis implica a capacidade de registar rapidamente padrões interferométricos, evitando a descorrelação dos padrões de *speckle* durante a aquisição de imagens. Se a *Shearography* em tempo real não sofre deste contratempo, pois apenas fornece padrões de intensidade, o mesmo não acontece com a *Shearography phase-step*. Estes sistemas, operados com *lasers* de emissão contínua, necessitam de sistemas de *phase-stepping* (PZT) de deslocamento muito rápido. Actualmente começam a surgir no mercado os primeiros sistemas de *phase-step* operando em tempo-real 12.5 Hz (Ettemeyer Q800) Outra solução é a utilização de algoritmos de cálculo da fase por FFT. Estes necessitam apenas da existência de uma frequência portadora espacial em 1 ou 2 interferogramas para que se faça o cálculo de fase. A introdução da frequência portadora implica, porém, a utilização de um interferómetro em que os dois percursos sejam independentes, como é o caso da configuração de Mach-Zehnder que foi descrita no capítulo 5.
- c) **Solicitação da estrutura:** A integração e controlo dos sistemas de estimulação é outro dos aspectos vitais para a utilização da *Shearography* como técnica de CND. A solicitação ideal deve fornecer o máximo de deformação da superfície na zona imediatamente sobre o defeito enquanto deixa o resto da estrutura inalterada. Para além disso a solicitação deve ser simples, rápida e inofensiva para o componente. Na prática é difícil aplicar uma força de maneira uniforme sobre uma superfície. A anisotropia do campo de forças aplicado gera

sempre franjas parasitas que dificultam a interpretação dos resultados. Outro problema consiste no facto de defeitos localizados profundamente na estrutura necessitarem de solicitações mecânicas mais intensas. A utilização de algoritmos capazes de fazer a integração de varias imagens pode resolver esta questão. Estes algoritmos podem ainda ajudar a resolver o problema de detectar ao mesmo tempo defeitos próximos da superfície e defeitos internos.

Os parágrafos que se seguem pretendem descrever as soluções implementadas nesta tese para resolver os problemas referidos ao mesmo tempo que dá uma perspectiva das actuais aplicações da técnica, sobretudo no sector aerospacial.

7.2 – SISTEMAS DE *SHEAROGRAPHY* DESENVOLVIDOS

Nesta tese foram desenvolvidos 2 sistemas de *Shearography*. O primeiro sistema baseia-se no interferómetro de Michelson e é uma evolução de um anterior sistema desenvolvido no LOME durante a tese de mestrado do autor [8]. Este sistema foi desenvolvido no âmbito de um projecto de I&D financiado pelo MDN, com a supervisão da Força Aérea Portuguesa e a participação das OGMA e do Departamento de Mecânica da FCTUC. Este facto só por si é uma prova do interesse da comunidade aeronáutica portuguesa nestas técnicas avançadas de inspecção não destrutiva. O segundo sistema de *Shearography* é um conceito totalmente novo que se baseia num interferómetro de Mach-Zehnder para realizar o *shear* de imagens. Este sistema permite a introdução de uma frequência portadora espacial no sistema permitindo a sua aplicação ao ensaio de estruturas estimuladas por ondas de choque em ambientes de elevada instabilidade.

7.2.1 – *SHEAROGRAPHY DE MICHELSON*

A peça fundamental deste sistema de inspecção não destrutiva consiste numa célula compacta, construída em alumínio, que integra o interferómetro de Michelson. Na figura 7.3 apresenta-se uma imagem da célula completamente montada.

Este dispositivo permite obter interferogramas da superfície dos objectos quando iluminados por uma radiação *laser* coerente. O *shear* entre imagens pode ser controlado externamente em ambas as direcções, actuando sobre dois parafusos. Esta célula integra além de várias lentes, um divisor de feixe e dois espelhos côncavos, que deverão ser ajustados para produzir duas imagens idênticas da superfície dos objectos em estudo.

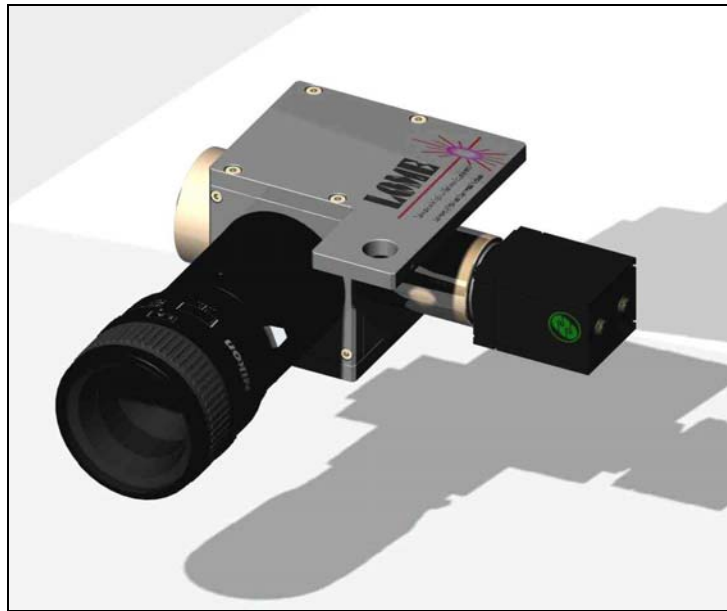


Figura 7.3 – Célula de imagem do sistema de *Shearography*.

Tendo como ponto de base de trabalho o protótipo LOME 1 foram tomadas algumas medidas no sentido de otimizar o seu desempenho na detecção de defeitos, sendo as principais:

- 1- Estudo da montagem óptica integrada na Célula do sistema. Para esta análise recorreu-se a um *software* de processamento óptico designado por SOLSTIS® v4.5.
- 2- Selecção de novos componentes ópticos para integrar o interferómetro. Destaque especial para a lente do sistema, lente convencional de vídeo, que foi substituída por uma lente Nikkor 60 mm para fotografia.
- 3- Montagem de novos espelhos em ambos os braços do interferómetro para aumentar a quantidade de energia no plano da imagem do sistema. Os espelhos planos que integravam a montagem inicial foram substituídos por espelhos côncavos.
- 4- Selecção e aquisição de um novo *laser* portátil com arrefecimento natural ao ar e de menores dimensões.
- 5- Aquisição de um cabo de fibras ópticas monomodo com 5 m de comprimento para realizar a iluminação aumentando a portabilidade da célula do sistema.
- 6- Utilização de um transdutor piezoeléctrico, modulador temporal de fase, mais rápido para diminuir o tempo de aquisição de imagens.

Na figura 7.4 representa-se uma vista explodida da célula onde são visíveis os vários elementos que a integram. No desenho dos componentes mecânicos do novo protótipo foi utilizado o programa SolidWorks®. Para além do cálculo óptico geométrico 2D o programa SOLSTIS® permite a optimização das montagens ópticas, quer em termos de aberrações, quer em termos de eficiência. Com este *software* é ainda possível

obter a geometria da frente de onda em vários planos perpendiculares à direcção de propagação colocados ao longo do eixo óptico do sistema.

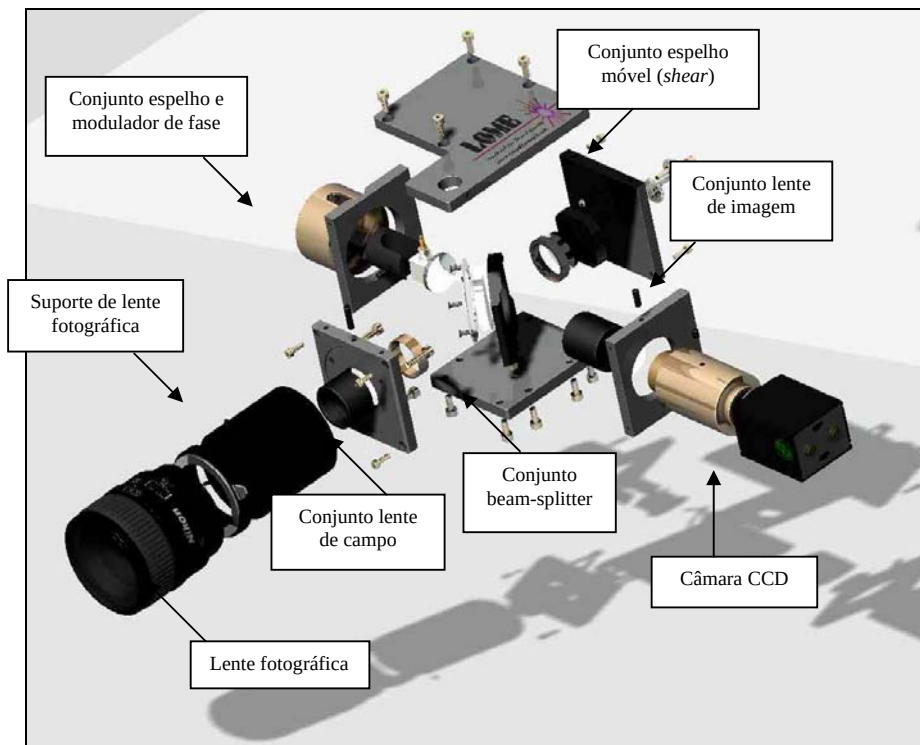


Figura 7.4 – Vista explodida da célula óptica do sistema de *Shearography*.

Este sistema foi utilizado na inspeção de vários componentes aeronáuticos, entre eles um componente da fuselagem traseira de um helicóptero Super-Puma (Eurocopter). Este componente, construído em material compósito e representado na figura 7.5 foi inspeccionado parcialmente. Trata-se de um componente de grandes dimensões constituído por uma estrutura em *sandwich* com um reforço de T300/Kevlar49 onde alguns descolamentos internos foram propositadamente introduzidos durante o processo de fabrico.

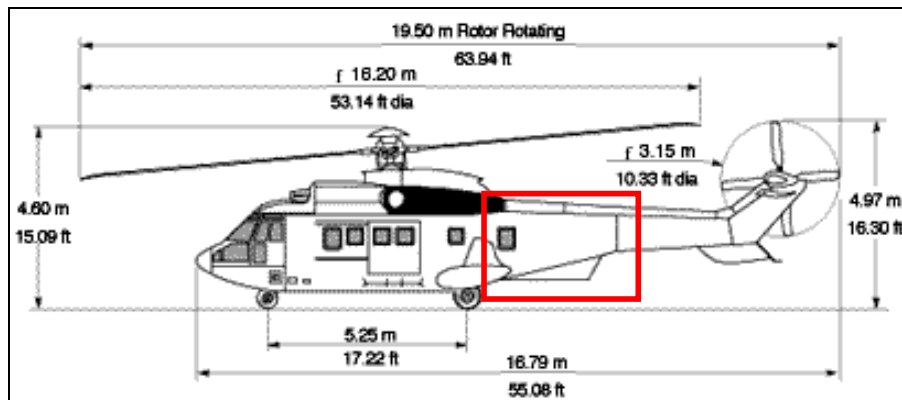


Figura 7.5 – Representação de um Super Puma. A área analisada está assinalada pelo rectângulo.

A inspecção deste componente fez-se através da estimulação térmica. Para isso recorreu-se a um sistema automático de aquecimento desenvolvido no LOME. Este sistema contém 8 lâmpadas de halogéneo de 50 W, e permite a fixação da célula óptica no seu interior, como se pode ver figura 7.6. Neste caso as duas lâmpadas situadas sob o sistema de imagem não são utilizadas para evitar franjas parasitas devido a correntes de convecção. O sistema gera uma potência de 300 W que pode ser controlada através de um PC.



Figura 7.6 – Sistema automático de estimulação térmica da estrutura.

O laser utilizado nestes ensaios foi um Coherent VERDI emitindo 500 mW @ 532 nm sendo os padrões interferométricos registados por uma câmara CCD Micam de 756h x 580v pixels. Foram obtidos padrões de interferência com elevado contraste, o que permitiu detectar a presença dos defeitos. Na figura 7.7 apresenta-se um dos mapas de fase obtidos no ensaio deste componente com a respectiva desmodulação que corresponde à variação contínua da fase em toda a imagem.

Desta forma pode concluir-se que os resultados obtidos com este componente são bastante animadores no que toca a uma futura utilização deste equipamento. Em todos os componentes testados posteriormente foram obtidos resultados de elevada qualidade que deixam antever as potencialidades de um sistema deste tipo para o CND.

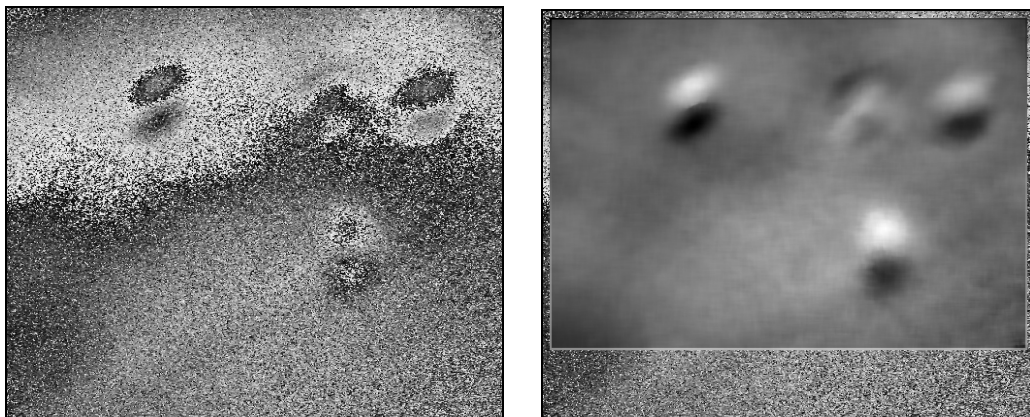


Figura 7.7 – Mapa de fase obtido na detecção de um conjunto de descolamentos no interior de um componente de fuselagem da cauda de um Super Puma.

A grande vantagem deste sistema compacto de *Shearography* reside no facto de ser um sistema de detecção de defeitos portátil que pode ser utilizado com um *laser* portátil de emissão contínua através da utilização de um suporte de fibra óptica. Para além disso, o facto de utilizar um transdutor piezoeléctrico rápido permite que o *phase-stepping* se faça com uma contribuição reduzida das perturbações ambientais na medida.

7.2.2 – SHEAROGRAPHY DE MACH-ZEHNDER

O segundo sistema de *shearography*, desenvolvido no âmbito desta tese, baseia-se no interferómetro Mach-Zehnder e a sua configuração está representada na figura 7.8. Este desenvolvimento foi realizado no âmbito do projecto Brite-Euram PDHS – *Pulse Digital Holography and Shearography*. A configuração desenvolvida integrava uma câmara CCD KODAK ES1.0 capaz de fazer dupla aquisição. Como fonte de luz coerente foi utilizado um *laser* de Ruby LUMONICS Modelo HSL2 que fornece por impulso cerca de 800mJ@693nm. O controlo dos tempos de atraso para o envio dos sinais de sincronismo é realizado através do sistema de *Trigger* construído pela empresa Steinbichler. Com este sistema são gerados os sinais para o disparo do *laser* de Ruby e o sinal para o arranque do sistema de aquisição vídeo. Estes sinais, por sua vez, dependem do sinal de disparo do percutor electromecânico que gera o fenómeno transiente na estrutura em estudo. A energia de impacto pode ser ajustada mediante a variação da carga acumulada nos condensadores do sistema actuador.

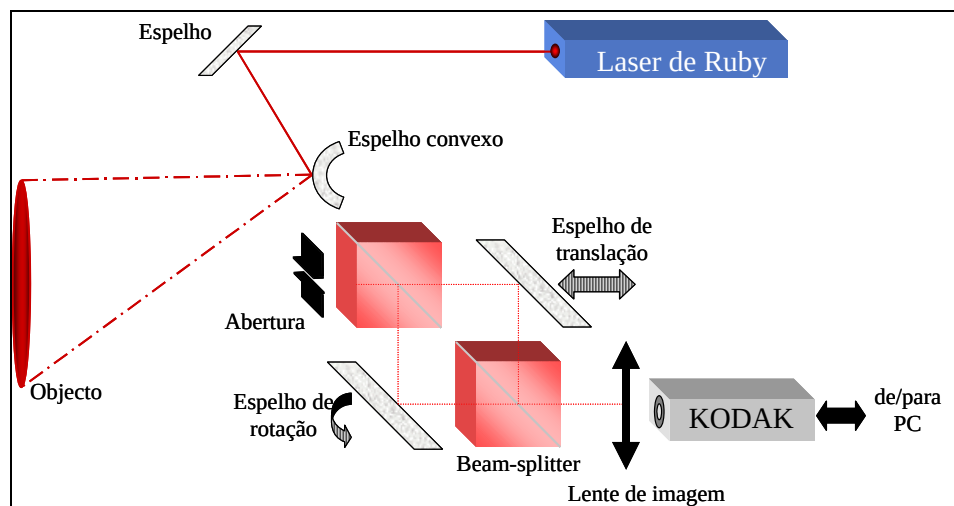


Figura 7.8 – Diagrama esquemático do interferómetro de Mach-Zehnder adaptado à medição de gradientes de deslocamento.

Como se referiu no capítulo 5 a abertura óptica do sistema deve ser reduzida para que os grãos de *speckle* tenham uma dimensão suficiente para gravar a frequência portadora espacial primária. No interferómetro de Mach-Zehnder apresentado a observação do objecto é feita através de uma abertura de forma rectangular

com uma largura de 0.75 mm e de uma objectiva colocada antes do CCD. As imagens da figura 7.9 mostram a montagem experimental utilizada. Na imagem da direita e em primeiro plano pode ainda observar-se, a abertura utilizada para criar um padrão de *speckle* longitudinal.

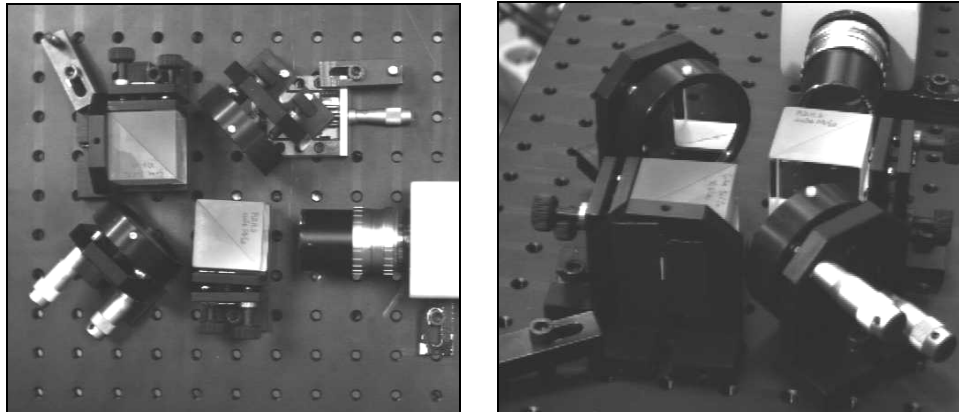


Figura 7.9 – Interferómetro de Mach-Zehnder em que a observação do objecto é feita através de uma abertura colocada à entrada do sistema óptico e de uma objectiva colocada antes do CCD.

Na figura 7.10 apresentam-se três imagens referentes ao mesmo padrão de interferência registado pelo sistema óptico num dado instante. Na primeira imagem representa-se o padrão de interferência e na segunda uma vista detalhada da estrutura do *speckle*. Neste pode verificar-se uma estrutura longitudinal recortada por franjas verticais que se inscrevem nos grãos. A última imagem representa o cálculo de fase do padrão de interferência anterior recorrendo a um algoritmo que utiliza FFT.

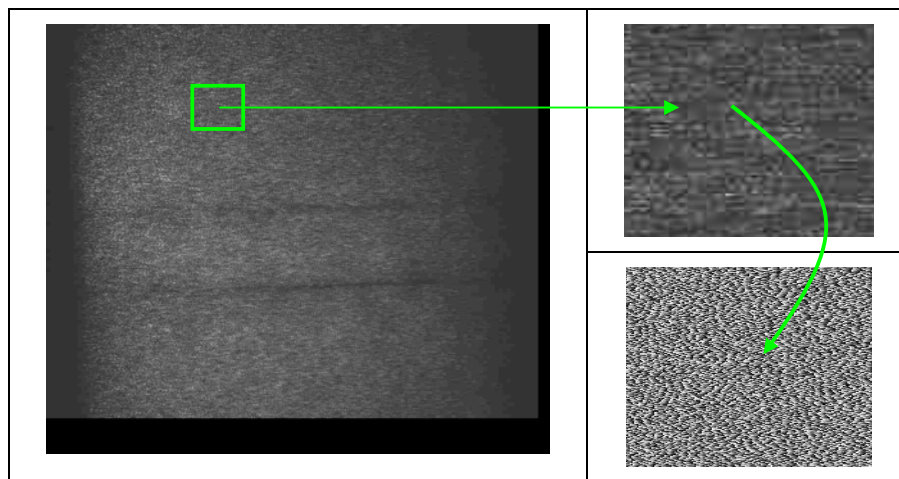


Figura 7.10 – Imagem do padrão de *speckle* registado através do sistema óptico, ampliação do padrão que permite observar as franjas portadoras primárias sobre os grãos de *speckle* e mapa de fase do padrão.

A avaliação deste sistema foi realizada através do estudo da propagação de uma onda de choque numa placa de material compósito com uma estrutura *sandwich*. O núcleo deste componente era em *Nomex* sendo as

peles em fibra de vidro. Nesta placa foram fabricados dois defeitos circulares de diâmetros 2.5 cm e de 1 cm. Na figura 7.11 apresenta-se uma imagem da placa inspeccionada que possui as seguintes dimensões: 400mm x 250mm x 30mm.

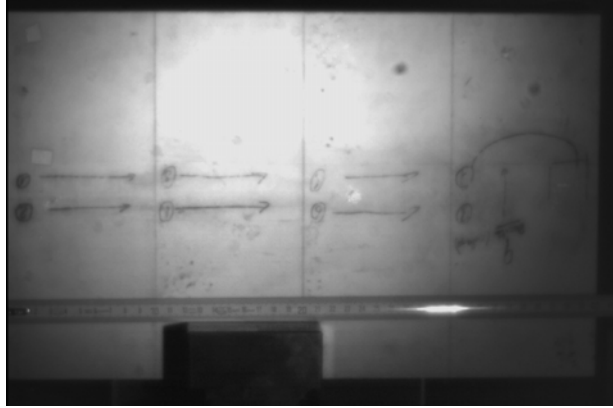


Figura 7.11 – Imagem do objecto em estudo. Estrutura *sandwich* com defeitos artificiais.

Foram realizados diversos ensaios com os impulsos *laser* disparados em diferentes instantes da propagação da onda de choque na placa. Através do registo do osciloscópio, para onde eram enviados os sinais do acelerómetro colocado na placa e do fotodíodo do *laser* de Rubi, é possível observar o instante em que foram realizados os disparos *laser* relativamente ao início do choque.

Na figura 7.12 apresenta-se uma sequência de imagens obtidas para diferentes tempos após impacto

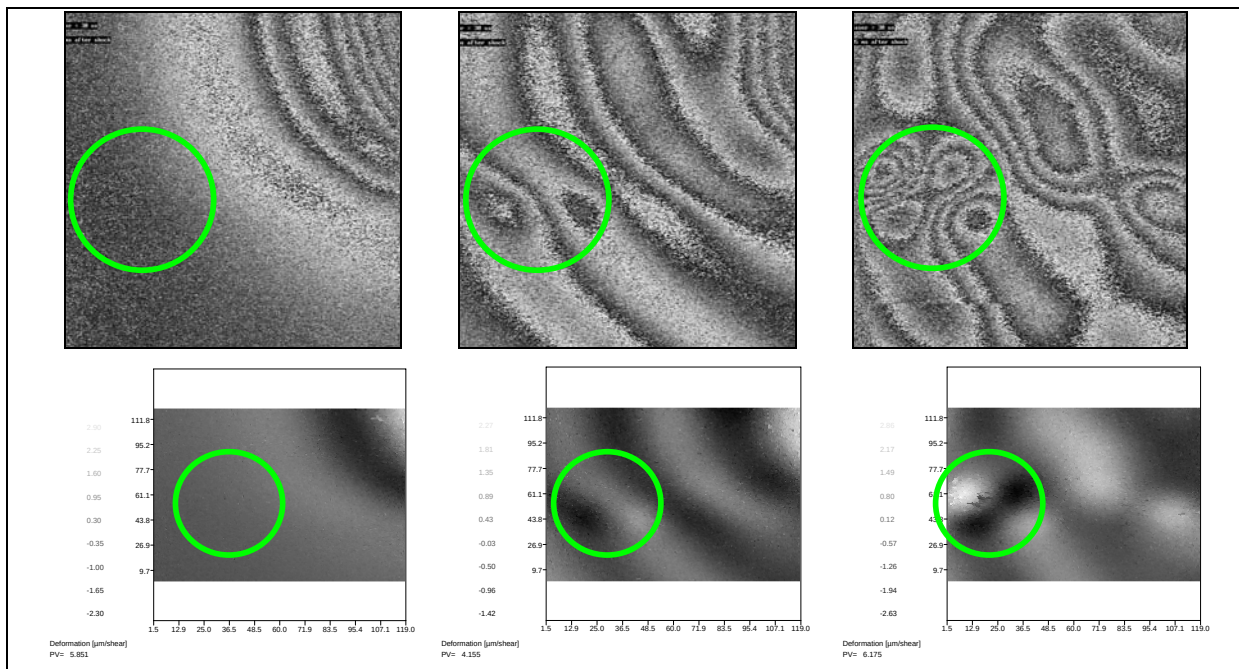


Figura 7.13 – Mapas de fase correspondentes à propagação de uma onda de flexão sobre uma zona defeituosa, antes e após a remoção das discontinuidades.

A primeira imagem apresenta o mapa de fase da superfície num instante em que a onda de choque está ainda no início da propagação, 25 μ s após o choque. A segunda figura representa a mesma área 40 μ s após o choque num instante em que a onda acabou de passar pela zona defeituosa revelando claramente o defeito. Como o tamanho do *shear* utilizado é superior ao tamanho do defeito os dois lóbulos da função gradiente estão separados. O terceiro mapa de fase, obtido 200 μ s após o choque, regista já reflexões nas paredes da placa de forma que introduz outros lóbulos na imagem.

A desmodulação dos mapas de fase revela também a presença do defeito estrutural na placa em estudo. No entanto, devido ao facto das amplitudes de deformação introduzidas serem elevadas, induzem modulações que mascaram parcialmente a menor modulação introduzida pelo defeito.

Deve referir-se que a aplicação da estimulação dinâmica a sistemas de *Shearography* se reveste de uma grande complexidade no que respeita à geração de sinais de sincronismo necessários à correcta aquisição dos padrões interferométricos. A sincronização entre os disparos do laser de impulso e os instantes de aquisição de imagens através da dupla exposição são, no entanto, a única forma de utilizar a *Shearography* em ambientes de elevada instabilidade [9].

7.3 – MÉTODOS DE SOLICITAÇÃO

Os métodos de CND necessitam de técnicas capazes de examinar ou inspeccionar uma estrutura, uma peça ou um material sem alterar as suas características mecânicas. Sendo a *Shearography* um método de controlo sem contacto e que necessita de solicitações mecânicas de pequena amplitude (dada a sua sensibilidade sub micrométrica) pode ser classificada entre os métodos de Controlo Não Destrutivo.

A *Shearography* permite avaliar a integridade de uma estrutura e assegurar a detecção de descontinuidades na transferência de carga. Para que os defeitos sejam visíveis à superfície das estruturas estas devem ser sujeitas a carregamentos mecânicos (aquecimento, depressão, vibração, choque,...) que gerem gradientes de deslocamento nas zonas defeituosas.

O método de carregamento deverá ser escolhido de acordo com o tipo de defeito que se pretende detectar. Os métodos convencionais para solicitar mecanicamente as estruturas são os seguintes:

- A) *Térmico* (para a detecção de descolamentos, intrusão de água, delaminações, corrosão).
- B) *Pneumático – pressão ou depressão* (para a detecção de descolamentos, delaminações, fissuras).
- C) *Vibração* – (para a detecção de descolamentos, corrosão).
- D) *Choque* – (para a detecção de descolamentos e delaminações).

7.3.1 – MÉTODOS CONVENCIONAIS

Em seguida descreve-se de uma forma simples as diferentes formas de solicitação de estruturas utilizadas no Controlo Não Destrutivo.

a) **Solicitação térmica** – A solicitação térmica baseia-se na existência de diferentes coeficientes de expansão térmica em zonas de uma estrutura que contém descolamentos, fissuras, delaminações, isto é, zonas estruturalmente debilitadas. Os ensaios são realizados antes e após um ligeiro e uniforme aquecimento da superfície do objecto. Em geral, os materiais mais espessos e com maior condutividade térmica necessitam de uma carga térmica mais importante. A estimulação térmica funciona especialmente bem em estruturas em CFRP na detecção de descolamentos, delaminações ou outros defeitos de impacto, pois o carbono exibe um grande coeficiente de expansão térmico. Durante a estimulação a superfície aquece mais rapidamente que o interior. Uma estrutura sã deformar-se-á uniformemente. No entanto, se existir um defeito, a zona defeituosa sofrerá uma dilatação localizada que revelará a presença do defeito. Este é, sem dúvida, o método mais vulgar de solicitar uma estrutura. A facilidade de utilização advém de recorrer a meios de estimulação tão simples como uma lâmpada de halogéneo ou um secador. Embora neste caso apareçam frequentemente deslocamentos globais devidos à deformação do componente é possível eliminá-los através da utilização de *software* adequado. Na figura 7.14 pode ver-se a eliminação, por *software*, de uma rotação de corpo rígido.

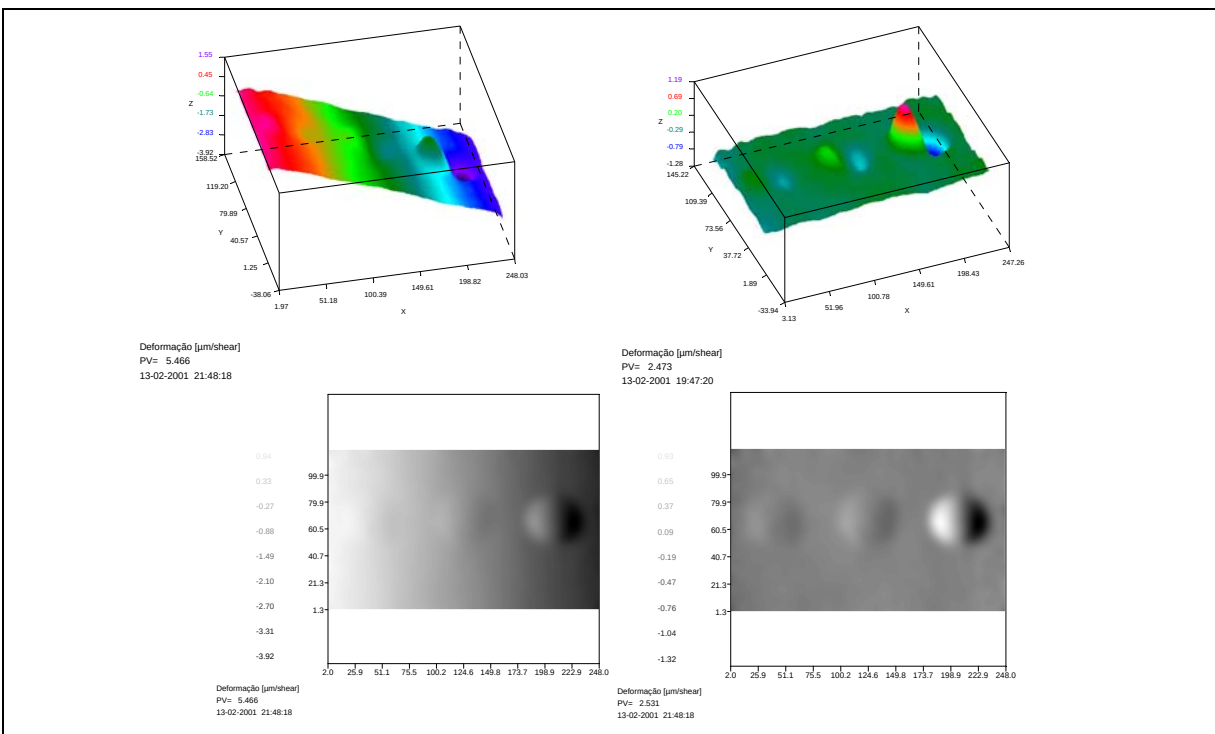


Figura 7.14 – Influência dos movimentos de corpo rígido na detecção dos defeitos.

b) Solicitação por pressão – A solicitação por pressão é aquela que permite uma maior reprodutibilidade do carregamento e a simulação de condições reais de utilização de alguns componentes. Apesar de ser mais difícil de utilizar que a solicitação térmica este tipo de solicitação conduz a resultados mais fiáveis. Esta solicitação baseia-se na criação de uma variação uniforme de pressão sobre a superfície exterior da estrutura. Em depressão, os descolamentos em estruturas *sandwich* são facilmente detectáveis. Os ensaios podem ser realizados em câmaras ou janelas de depressão, sendo este método muito eficaz em estruturas ligeiras.

O controlo de reservatórios de pressão é frequentemente realizado através de ligeiros acréscimos de pressão. Este método é muito útil na detecção de fissuras ou delaminações neste tipo de componente. Na figura 7.15 descreve-se esquematicamente este tipo de solicitação, mostra-se um padrão de franjas obtido com esta técnica e dois equipamentos utilizados neste tipo de carregamento, câmara e janela de depressão.

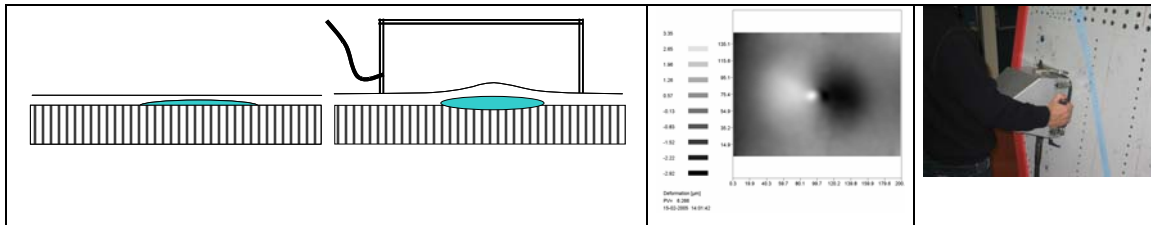


Figura 7.15 – Descrição sumária da excitação por pressão, janela e câmara de depressão.

c) Solicitação por vibração – A solicitação vibratória pode ser utilizada com a *shearography* para visualizar os modos de vibração natural da estrutura. A presença dos defeitos pode ser revelada por alterações nos modos de vibração da estrutura ou por excitação dos modos de vibração da zona defeituosa. Testes realizados sobre descolamentos existentes em painéis *sandwich* Carbono/Al apresentaram frequências de ressonância entre 5 KHz e 12 KHz. A estimulação vibratória tem um desempenho particularmente bom na detecção de descolamentos em estruturas *sandwich* com o núcleo metálico. Contudo, esta técnica funciona menos bem para estruturas *sandwich* com peles em *Kevlar* e núcleos em *Nomex*. Na figura 7.16 descreve-se esquematicamente este tipo de solicitação, mostra-se um padrão de franjas obtido com esta técnica e um equipamento utilizados neste tipo de carregamento, excitador electrodinâmico.

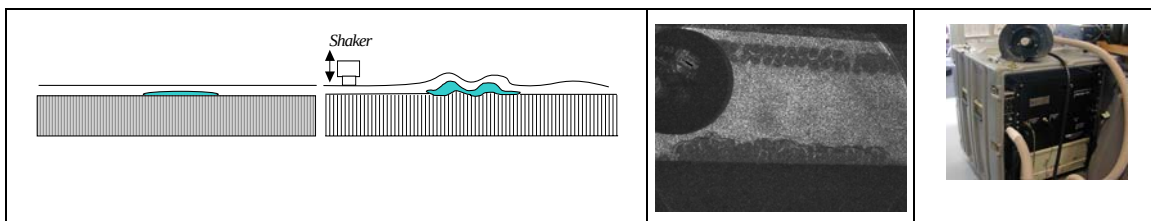


Figura 7.16 – Descrição sumária da excitação por vibração e excitador electrodinâmico.

d) **Solicitação por choque** – A solicitação por choque baseia-se na observação da propagação de ondas de flexão numa estrutura e da sua interacção com zonas defeituosas. As zonas defeituosas são reveladas pelo gradiente de deformação associado à propagação da onda de flexão sobre o defeito. Com esta técnica, após o início das reflexões da onda, a interpretação dos padrões é bastante mais difícil. Para além disso, a sua reprodutibilidade não é trivial e soluções do tipo ventosa devem ser utilizadas para que o sistema electromecânico de impactos possa ser aplicado de forma controlada. Este é contudo o método que deve ser utilizado em ambientes muito ruidosos e quando se utilizam lasers de impulso. Na figura 7.17 descreve-se esquematicamente este tipo de solicitação e mostra-se um padrão de franjas obtido com esta técnica.

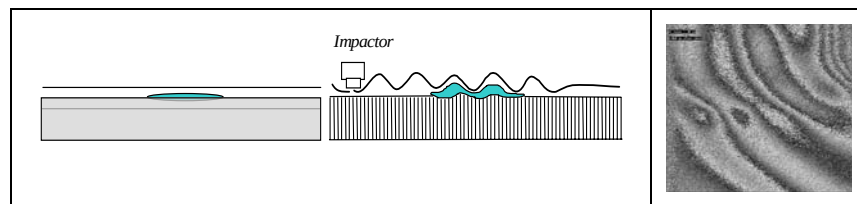


Figura 7.17 – Descrição sumária da excitação por choque.

Não é demais referir que todos os aspectos relativos ao tipo de estrutura, tipo de defeito a detectar e posição deste devem ser tidos em conta na selecção do método de solicitação mais conveniente. Uma escolha acertada facilitará o processo de detecção dos defeitos.

7.3.2 – DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SOLICITAÇÃO POR MICRO-ONDAS

Hoje em dia os materiais compósitos à base de carbono são utilizados numa variedade enorme de produtos industriais. Frequentemente utilizados pela sua baixa densidade e elevadas propriedades mecânicas os materiais compósitos em carbono perdem as suas propriedades mecânicas quando em contacto com humidade. Assim, devido à sua porosidade, um material compósito com uma resina epóxida polimerizada pode absorver até 6% da sua massa em água. Como consequência os utilizadores destes materiais procuram soluções para a detecção da intrusão de água nas estruturas.

A *shearography* está perfeitamente adaptada a esta aplicação pois trata-se de um método de detecção do enfraquecimento local da estrutura por efeito de uma leve solicitação mecânica. Os fabricantes de aparelhos de *shearography* desenvolveram vários sistemas de solicitação das estruturas tal como se descreveu no parágrafo anterior. Contudo, a solicitação por micro-ondas embora pareça adequada para este fim nunca foi abordada seriamente.

As micro-ondas, ou hiper frequências, são ondas electromagnéticas cujas frequências se situam entre 300 MHz e 300 GHz. Os dois principais domínios de aplicação das micro-ondas são as transmissões rádio e o

aquecimento. Esta forma de aquecimento aplica-se a todo o tipo de material dieléctrico susceptível de polarização sob a acção de um campo eléctrico (madeira, plásticos, água, ...).

A norma europeia NE 55011 especifica as frequências a que devem trabalhar os aparelhos industriais, científicos e médicos, bem como as condições em que estes métodos podem ser utilizados. Para as aplicações ligadas ao aquecimento, as frequências usadas são os 2450 MHz e 915 MHz, com tolerâncias de variação muito baixas pois certos harmónicos correspondem a frequências utilizadas em telecomunicações.

O caso da molécula de água

Sendo a molécula água uma molécula dipolar, apresenta uma assimetria geométrica mesmo na ausência de um campo eléctrico, pois o centroide (C+) das suas cargas positivas não coincide com o centroide (C-) das cargas negativas, ver figura 7.18.



Figura 7.18 – Representação esquemática da molécula de água e dos centroides das suas cargas.

Na ausência de um campo eléctrico, as moléculas dipolares orientam-se de uma forma aleatória, gerando um momento dipolar global nulo. Pelo contrário, quando um campo eléctrico contínuo está presente as moléculas tendem a orientar-se de acordo com a direcção do campo.

A aplicação de um campo alternado, à frequência de 2450 MHz, faz com que a orientação dos dipólos varie em cada ciclo. Esta inversão de dipólos provoca uma transferência de parte da energia electromagnética em energia mecânica com a consequente geração de calor.

Os resultados apresentados em seguida pretendem por em evidencia as vantagens da utilização deste método de solicitação na detecção de zonas húmidas, em materiais não ferrosos, por meio da *shearography*. A adaptação à *shearography* de um sistema de solicitação térmica por micro-ondas deverá permitir:

- Uma penetração imediata (pois ao contrário dos outros tipos de aquecimento, a condutividade térmica não intervém), o que se reflecte em ganho de tempo de inspecção,
- Um método selectivo de aquecimento das diferentes matérias presentes na estrutura.

Ensaio em estrutura sandwich CFRP/Nomex

Para avaliar as potencialidades desta técnica de estimulação de estruturas foram realizados alguns ensaios experimentais. Estes ensaios foram realizados em dois tipos de fornos Um forno doméstico e um forno

industrial. Uma câmara termográfica AGEMA 470 foi utilizada como meio de controlo da uniformidade do aquecimento.

O método clássico de aquecimento por lâmpada de halogéneo foi utilizado com o objectivo de comparar os desempenhos de cada um dos sistemas de solicitação. Pelos resultados apresentados na figura 7.19 podem observar-se as diferenças existentes entre os resultados obtidos com estes dois métodos de aquecimento.

Nesta figura pode constatar-se que:

- No processo por infra-vermelhos a radiação entra em contacto com uma *interface* da estrutura para depois o calor a atravessar por condução. A estrutura aquece como um todo e as diferenças de nível aparecem sobretudo devido às diferenças na propagação de calor na estrutura
- No processo por micro-ondas a radiação acede directamente à matéria desejada (água). Assim, a transferência de calor faz-se entre zonas de temperaturas diversas, i.e. com gradientes mais elevados. O aquecimento por microondas é, devido à sua selectividade, o que provoca maiores diferenças térmicas.

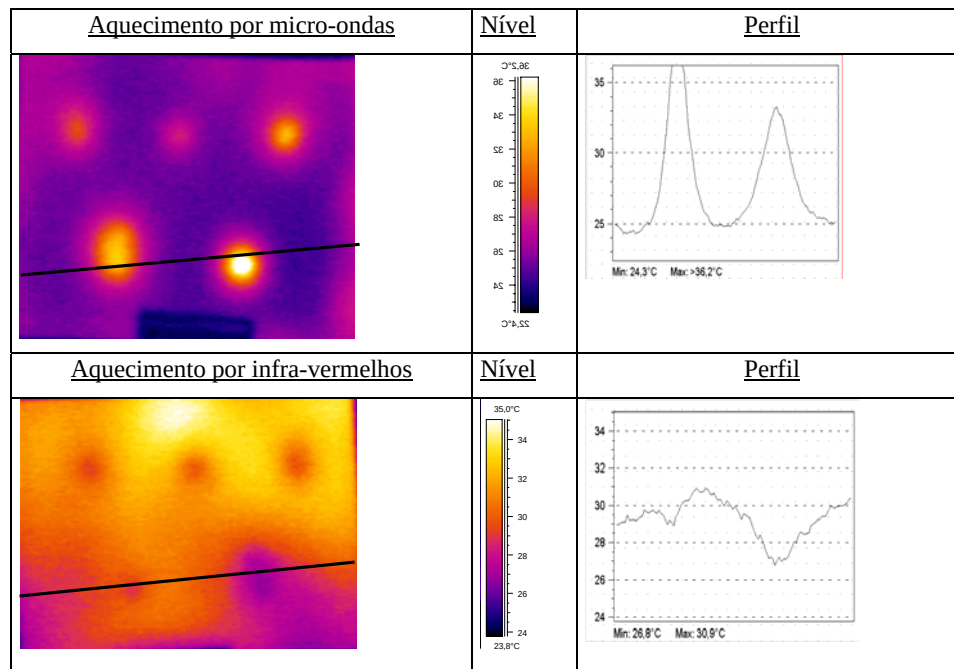


Figura 7.19 – Comparação entre o aquecimento por micro-ondas e o aquecimento por infra-vermelhos.

Durante este conjunto de ensaios houve a possibilidade de efectuar medidas de temperatura pontuais. A utilização de sensores de temperatura por fibra óptica “Photonetics” permitiu verificar a transferência de calor durante a emissão das microondas nas zonas com e sem água, ver gráficos da figura 7.20. Os gráficos apresentam duas situações distintas. No primeiro representam-se duas medições locais de temperatura, a sonda 1 encontra-se numa célula vazia e a sonda 2 na pele imediatamente exterior à célula. No segundo representa também duas medições locais mas desta vez a sonda 1 está numa célula contaminada com água.

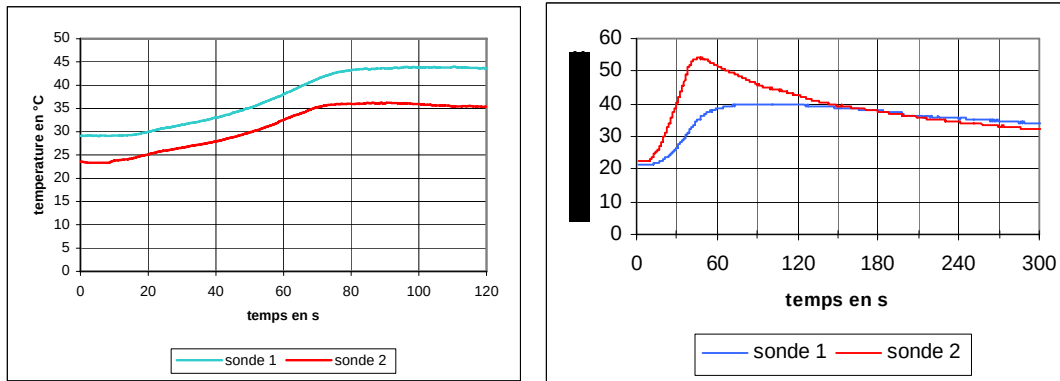


Figura 7.20 – Evolução de temperaturas com e sem água utilizando aquecimento por micro-ondas.

As diferenças entre os dois sinais do primeiro gráfico devem-se a um pequeno erro na calibração das sondas, não se registando qualquer diferença no comportamento das duas células. No segundo gráfico verifica-se que existe um gradiente de temperaturas elevado entre as duas sondas. Esta diferença de temperaturas vai originar uma deformação mecânica, fora do plano, entre as zonas sãs e as zonas contaminadas pela água. É este efeito que é posto em evidência pela *shearography* como se pode ver na figura 7.21.

Na figura da esquerda, imagem referente à solicitação por infra-vermelhos, pode observar-se um padrão de franjas de interferência devidas à deformação global da superfície aquecida. Pelo contrário, a imagem referente à solicitação por micro-ondas revela uma ausência quase total desse tipo de franjas. Desta forma o aquecimento selectivo da estrutura não mascara a informação devida à presença de água e as zonas de interesse podem, mais claramente, ser identificadas.

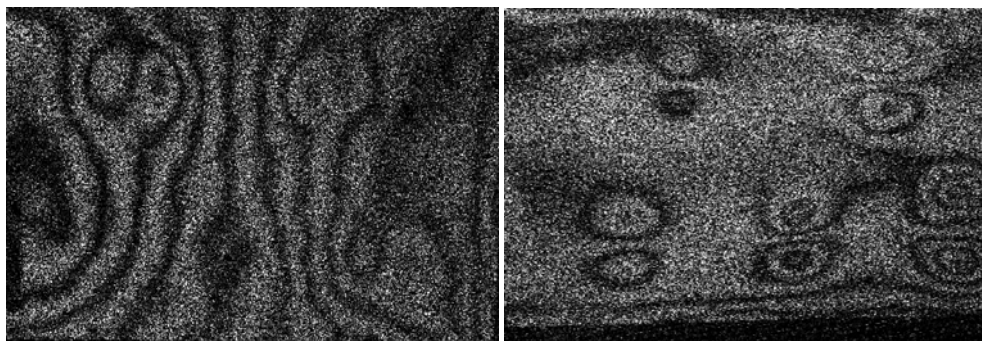


Figura 7.21 – Registos de *Shearography* obtidos com excitação térmica por infra-vermelhos e por micro-ondas.

Estes resultados permitem concluir que a solicitação por micro-ondas associada à *shearography* pode ser utilizada para identificar zonas contaminadas de água, em estruturas *sandwich*, com as peles em CFRP [10]. Contudo, a construção de um sistema portátil e seguro para este fim deverá respeitar os seguintes requisitos:

- aquecimento uniforme da estrutura, através de um correcto dimensionamento da cavidade ressonante
- sistema automático de paragem se as fugas ultrapassarem os limites legais (5 mW/cm²).
- portátil, com o transformador exterior à cavidade.

Outra possibilidade é a integração de mini antenas no interior das estruturas para gerarem as micro-ondas nas regiões a inspeccionar. Estes sistemas serão inerentemente mais seguros, quer para o operador, quer para a integridade dos materiais pois as energias envolvidas são muito inferiores.

7.4 – APLICAÇÕES AERONÁUTICAS

A manutenção de aeronaves é um sector chave do transporte aéreo não só para os fabricantes de aviões mas, sobretudo, para as companhias de aviação que os operam. As operações de manutenção são sempre feitas a contra gosto dos operadores pelo que deverão ser realizadas o mais rapidamente possível. No entanto, estes tempos de intervenção são sempre da ordem de semanas. É, por isso, desejável encontrar métodos que permitam encurtar os tempos destinados a estas intervenções sem comprometer os níveis de segurança. Sendo este um sector importante para a afirmação da Europa como pólo tecnológico de importância mundial a comissão europeia tem vindo a financiar programas de investigação e desenvolvimento na área da manutenção aeronáutica. Estes programas têm tido sempre como objectivo o desenvolvimento de protótipos que permitam reduzir o tempo de paragem das aeronaves durante as operações de manutenção e em simultâneo permitam detectar defeitos com maior antecedência.

Durante esta tese o autor teve a possibilidade de participar com alguma intensidade em dois programas Brite-Euram na área referida, o programa EUCLID (participação do INEGI) e o programa CANDIA (participação da NDT Expert). Também o já referido programa PDHS (participação do INEGI) teve uma componente importante na área do CND. O 5º Programa Quadro de I&D da Comissão Europeia vai permitir continuar estes desenvolvimentos através do projecto INCA (participação NDT Expert).

Os resultados que se apresentam em seguida foram obtidos durante programas de I&D (financiados pela União Europeia e pela Airbus) e em ensaios de aplicabilidade da técnica de *Shearography* em estruturas aeronáuticas e espaciais. Estes ensaios são um bom exemplo da aplicação industrial das técnicas desenvolvidas ao longo desta tese.

7.4.1 - SISTEMAS COMERCIAIS

Dado que o sistema de *Shearography* desenvolvido pelo LOME e baseado no interferómetro de Mach-Zehnder não passou da fase de protótipo nas medições realizadas posteriormente pelo autor, no âmbito da sua actividade com elemento da NDT Expert, foram utilizados sistemas comercializados por outros grupos de investigação. Este parágrafo descreve sucintamente dois desses sistemas de *Shearography* com que o

autor teve a oportunidade de trabalhar. O primeiro é um sistema baseado na configuração de Hung, comercializado pela firma norte-americana Laser Technology, Inc e o segundo é um sistema baseado na configuração de Michelson e comercializado pela firma alemã Ettemeyer.

Sistema de Hung - Laser Technology, Inc

Na figura está representado esquematicamente o sistema interferométrico de Hung que se baseia na utilização de um elemento óptico birrefringente para gerar o *Shear* da imagem. Os principais componentes que integram este sistema são o cristal birrefringente, uma lente formadora de imagem e um polarizador. Assim, como o cristal birrefringente é capaz de gerar dois feixes com polarizações ortogonais e ligeiramente desviados (dependendo da espessura de cristal atravessado) a partir de um feixe incidente, também o percurso inverso é verdadeiro: dois feixes incidentes no cristal geram um feixe transmitido em que coexistem as duas direcções de propagação ortogonais. Desta forma, para que se obtenha um padrão de franjas é necessário colocar um polarizador a 45° no percurso óptico impondo a mesma polarização aos dois feixes de igual intensidade. Na figura 7.22 representa-se esquematicamente esta montagem óptica.

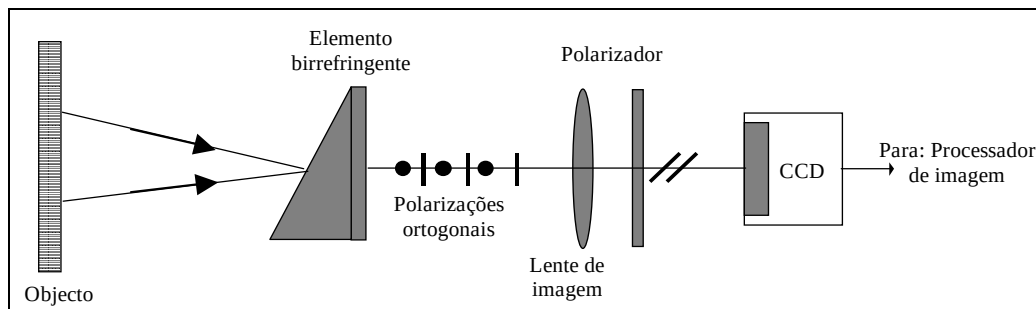


Figura 7.22 – Montagem óptica utilizada no sistema de *Shearography* proposto por Hung.

Nas inspecções realizadas pelo autor e que são descritas nesta tese foi utilizada a versão 4000 do sistema de *Shearography* comercializada pela empresa LTI. Este sistema de inspecção é constituído por dois blocos:

- O bloco IP4000 designado por bloco de processamento de imagem. Este módulo tem como função principal registar imagens, fazer a sua amostragem à frequência vídeo e realizar a subtracção em tempo real dos padrões interferométricos. As imagens são visualizadas através de um ecrã cinescópico integrado na parte frontal. Possui ainda a capacidade de controlo automático do posicionamento dos componentes ópticos. Quer isto dizer que os ajustes de *zoom*, íris e focagem são feitos electronicamente. Este sistema admite ainda a montagem de placas de controlo para operar automaticamente os sistemas de estimulação.
- O bloco SC4000, módulo portátil que inclui o interferómetro e o sistema de iluminação. O sistema de iluminação é de elevada qualidade pois integra um elemento difractivo que transforma o perfil gaussiano do feixe laser num campo de luz uniforme. Deste modo são conseguidos excelentes

padrões de iluminação. Este bloco permite ajustes manuais da paralaxe da iluminação e da divergência do feixe.

Na iluminação foi utilizado um laser de Nd:YAG bombeado por díodos com uma potência de 100 mW @ 532 nm. Como principal atributo deste sistema pode referir-se a sua elevada eficiência óptica que permite a obtenção de padrões de interferência de excelente contraste. Desta forma o controlo de peças em tempo real pode ser feito sem necessidade de qualquer processamento digital. Como principais desvantagens pode indicar-se o facto de lhe estar vedada a possibilidade de efectuar cálculos de fase necessária às medições quantitativas e não permitir variar a amplitude do Shear.

Sistema de Michelson – Ettemeyer

O sistema comercializado pela empresa Ettemeyer integra uma montagem de Michelson muito semelhante à desenvolvida pelo autor durante esta tese. Neste sistema a interferência é feita através da combinação de duas frentes de onda obtidas por divisão da frente de onda objecto. A utilização de um pequeno percurso em que as ondas se encontram separadas permite que estas possam ser controladas independentemente. É desta forma que se obtém o *shear* das imagens, através da rotação de um espelho utilizado num dos braços do sistema. A modulação de fase é realizada através da translação do outro espelho por intermédio da aplicação de uma tensão variável, a um elemento piezoeléctrico solidário com ele.

A versão deste sistema que foi utilizada era constituída igualmente por dois blocos:

- O bloco de processamento de imagem, que pode ser considerado a alma deste sistema. Grande parte dos bons resultados obtidos é devido às rotinas extremamente eficazes de tratamento de imagem. Esta unidade pode ser considerada portátil e é basicamente um computador, com ecrã plano e teclado integrado. É esta unidade que controla todo o *hardware* de aquisição de imagens e o *software* de tratamento posterior.
- O bloco sensor, que inclui o sistema interferométrico e que pode ou não integrar completamente o sistema de iluminação. Em relação à iluminação dois casos foram utilizados; o primeiro faz uso de um díodo laser integrado no sensor, tornando a unidade extremamente compacta (9x6x6 cm³) e o segundo, que faz uso de um laser independente cuja iluminação é conduzida até ao sensor através de uma fibra óptica.

A potência emitida pelo díodo laser era de 50 mW @ 780 nm e a potência do segundo, um laser Nd:YAG bombeado por díodos, da firma Coherent, emitia 400 mW @ 532 nm.

As vantagens da utilização deste sistema estão na sua elevada portabilidade (díodo laser) e na possibilidade de efectuar medições quantitativas através do cálculo de fase. Frequentemente as rotinas de pós-processamento de imagem tornam os defeitos mais evidentes e a interpretação das imagens é facilitada. A sua desvantagem resulta do facto de ter uma eficiência luminosa menor (*beam-splitter*) e de ser mais sensível às vibrações parasitas. Estas desvantagens assumem particular relevância quando o sistema é utilizado em estaleiro para inspecções de grandes superfícies.

7.4.2 - DETECÇÃO DE DEFEITOS

Corrosão

A corrosão é um tipo de dano ao qual a indústria aeronáutica tem dedicado especial atenção nestes últimos anos. Com efeito o envelhecimento das frotas torna este tipo de dano um problema principal no que diz respeito às operações de manutenção. Programas específicos para o desenvolvimento de novas técnicas de detecção existem, nomeadamente no seio da Airbus.

Uma das formas mais importantes de corrosão em estruturas aeronáuticas é o *surface pitting*. Este tipo de corrosão resulta de reacções electroquímicas em locais de descontinuidade micro-estrutural, tais como inclusões e juntas de grão. A corrosão aparece inicialmente como uma zona branca para depois formar pequenas cavidades.

Este parágrafo apresenta os resultados de uma inspecção por *Shearography* a duas peças representativas deste tipo de defeito. A primeira estrutura é uma peça *standard* fornecida pela Airbus Deutschland com defeitos artificiais que pretendem simular o *pitting* da estrutura. Na figura 7.23 apresenta-se um esquema da peça com as simulações de corrosão ao lado dos resultados obtidos na inspecção.

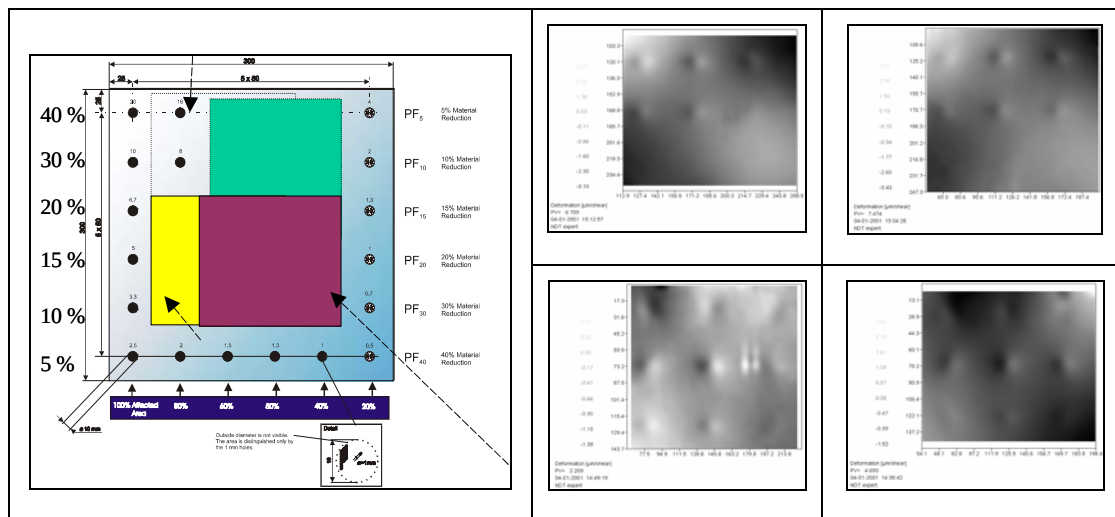


Figura 7.23 – Peça de Alumínio contendo defeitos de corrosão por *pitting* e resultados obtidos na sua inspecção com *Shearography*.

É uma peça em alumínio 2024 de 3.26 mm de espessura com uma protecção *alclad*. Este tipo de protecção é utilizado frequentemente na aeronáutica e corresponde à deposição de uma camada de alumínio puro sobre o substrato base. Neste caso foi observada uma boa detectabilidade dos defeitos, mesmo para uma espessura desta ordem de grandeza. Pelo contrário, os defeitos simulados perto dos bordos da peça não são visíveis. Este facto deve-se, provavelmente, a efeitos de bordo não desprezáveis existentes numa estrutura em alumínio com esta espessura.

A estrutura em estudo é uma peça da fuselagem de um A300 em alumínio 2024 *alclad* e com uma protecção suplementar de pintura e continha zonas de corrosão real do tipo *surface pitting* e esfoliação. A figura 7.24 apresenta os resultados obtidos em testes comparativos entre a *shearography* e o método baseado na detecção de Correntes de Foucault (CF). Os resultados permitem concluir que, apesar da cartografia CF ser mais detalhada e conter uma melhor definição da zona corroída; a cartografia da deformação da superfície obtida pela *shearography* revela também a indicação de uma zona importante de corrosão. A vantagem da *shearography* advém do facto de esta imagem ter sido obtida em menos de dois minutos, através de uma inspecção global da estrutura.

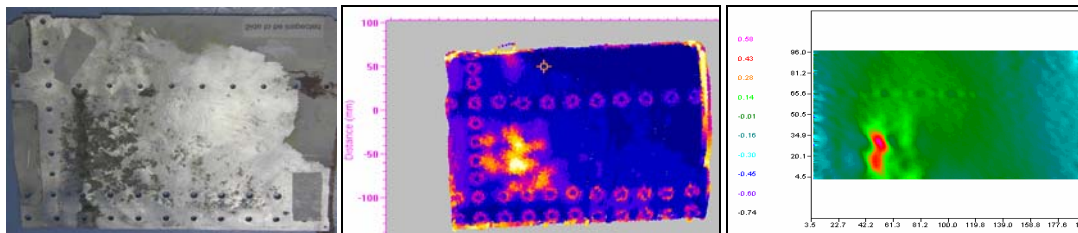


Figura 7.24 – Comparação entre os resultados obtidos por Correntes de Foucault e *Shearography* na detecção de defeitos provocados por corrosão num componente do avião A300.

Delaminações

Actualmente, a maior parte das inspecções para a detecção de danos de impacto em estruturas de material compósito é feito através das técnicas de ultra-sons. A *shearography* pode, neste caso, ser um sério concorrente aos ultra-sons, técnica consagrada na indústria desde há décadas. A *shearography* oferece a vantagem da inspecção de grandes zonas ser mais rápida, não necessitar de contacto com os componentes, de inspecionar superfícies curvas ou de geometria complexa, de inspecionar áreas que atenuam ou dispersam os ultra-sons e finalmente de verificar a integridade estrutural de um componente para além da mera detecção passiva de defeitos sem ser necessário submergir o componente ou utilizar qualquer meio de acoplamento.

Um exemplo de detecção de danos de impacto com sistemas comerciais é apresentado em seguida. Na figura 7.25 apresenta-se uma estrutura monolítica em CFRP, representativa de uma secção da asa de um ATR-42 e os resultados obtidos na sua inspecção com ultra-sons e com *Shearography*. Esta estrutura foi submetida a dois impactos com um projectil rígido. A inspecção foi realizada através de um sistema de solicitação térmico e a aquisição de imagens foi feito através do sistema comercializado pela empresa Ettemeyer modelo Q800. O resultado obtido com a técnica óptica permite uma fácil identificação dos defeitos, semelhante aos resultados obtidos na cartografia por ultra-sons. Para além disso é de notar que mesmo utilizando um laser de 50 mW quase toda a placa é inspecionada de uma só vez o que permite reivindicar para *shearography* uma redução dos tempos de inspecção de aproximadamente uma ordem de grandeza.

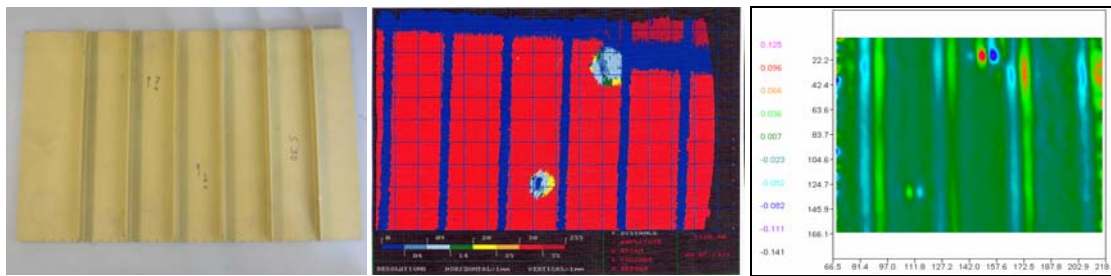


Figura 7.25 - Comparação dos resultados obtidos por ultra-sons e *Shearography* na inspecção de um componente contendo delaminagens. Área de observação com a *Shearography* igual a 40cm x 30cm.

Descolamentos

A ocorrência de descolamentos é outro dos defeitos frequentes em componentes para aplicações aeronáuticas e aeroespaciais. Os resultados que se apresentam foram obtidos pelo autor na inspecção de uma estrutura *sandwich* num trabalho realizada para a empresa Alcatel Space. Estas estruturas foram fabricadas em CFRP com o ninho de abelha em Nomex e continham diversos tipos de descolamentos que foram simulados durante o processo de fabrico. Na figura 7.26 podem ver-se dois dos padrões de franjas obtidos com o sistema LTI durante a inspecção deste componente.

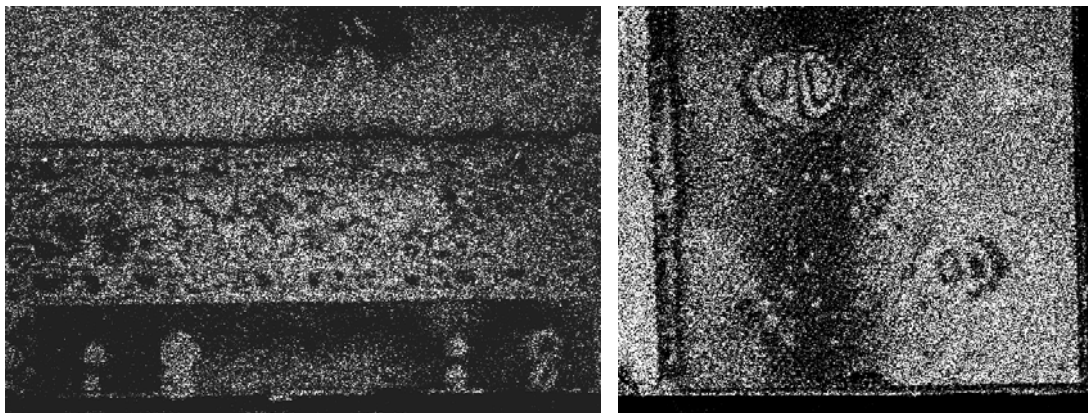


Figura 7.26 – Detecção de descolamentos com *Shearography* numa estrutura fabricada em CFRP e Nomex.

Absorção de líquidos

Estes testes foram levados a cabo em duas estruturas representativas do *Elevon* do avião Concorde. São estruturas *sandwich* com o núcleo em ninho de abelha (NIDA) de alumínio e as peles no mesmo material. Uma das estruturas tinha 0.6 mm de espessura e a outra 3.4 mm. Estes valores de espessuras representam os valores mínimos e máximos que se podem encontrar neste tipo de estruturas. A espessura do NIDA é, para ambas, de 5 mm. Na figura 7.27 representa-se esquematicamente uma dessas peças com a indicação dos defeitos artificialmente introduzidos. Foram construídas estruturas com 4 defeitos de colagem e com 4 defeitos de falta de matéria. Ao centro foram abertas duas zonas onde é possível fazer a introdução de água nos alvéolos.

Na figura está representada esquematicamente a localização e dimensão dos defeitos. Os defeitos maiores têm um diâmetro de 38.1 mm e os mais pequenos de 6.35 mm. A área de observação foi de cerca de 35 cm x 27 cm. Verificou-se também que a quantidade de água introduzida nas células mesmo se reduzida (ex. três gotas de água numa célula) induz uma informação mensurável à superfície da estrutura. Na coluna da direita representam-se os resultados obtidos na inspeção deste componente com *Shearography*. Além do mapa de fase apresenta-se ainda uma representação em falsa cor onde as regiões com defeitos são de fácil identificação.

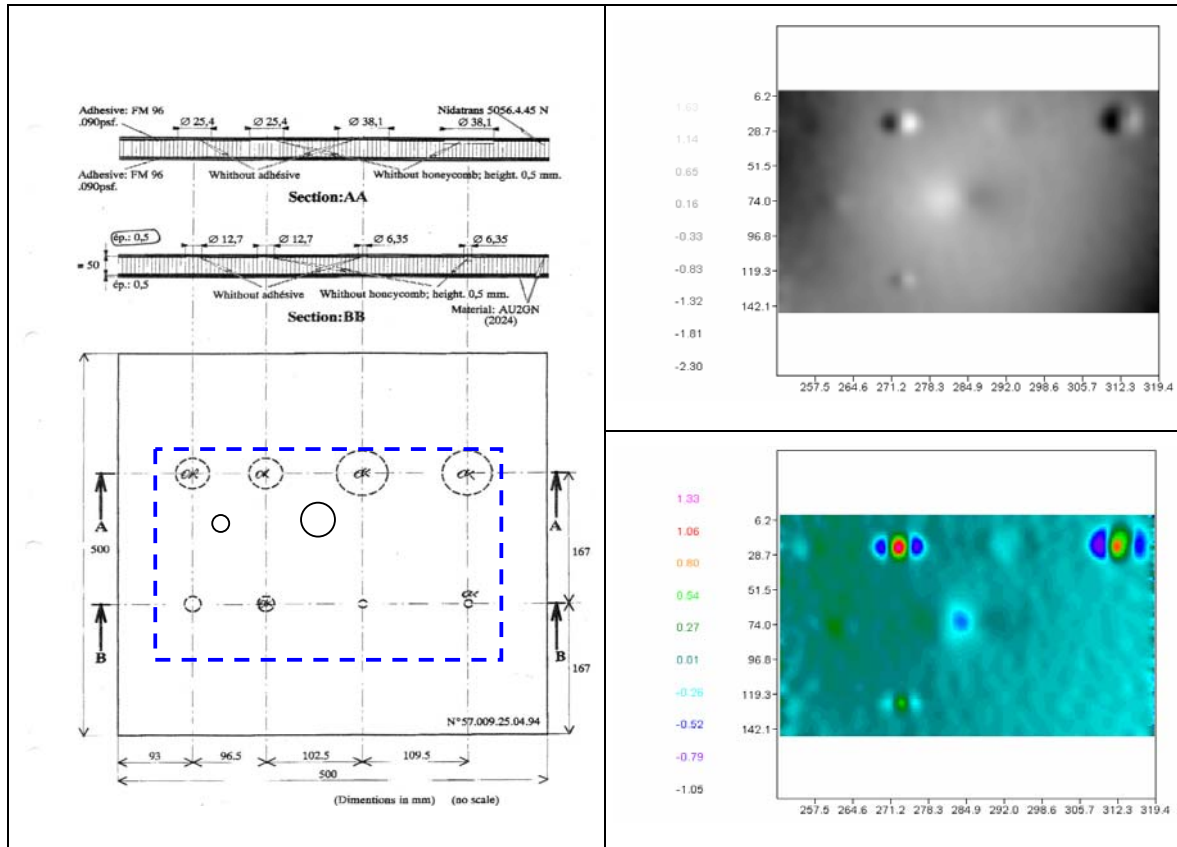


Figura 7.27 – Detecção de defeitos em estrutura do tipo Eleveon CONCORDE.

Controlo de reparações

Outra aplicação possível da *Shearography* é no controlo de reparações das estruturas, situação onde mesmo os ultra-sons têm uma aplicabilidade reduzida. Durante a sua actividade na empresa NDT Expert o autor teve a oportunidade de utilizar esta técnica no controlo de reparações realizadas no *Eleveon* do avião Concorde. São apresentados na figura 7.28 os resultados do controlo de duas reparações realizadas neste componente. É possível verificar que a primeira reparação não é perfeita pois não restituiu as características originais do componente. As franjas de deformação não são circulares como deveriam se a reparação fosse perfeita. Neste caso a reparação deveria permitir uma transferência de carga uniforme e as franjas de deformação seriam as

correspondentes a uma deformação global provocada pela excitação. A segunda reparação, pelo contrário, não apresenta nenhuma anomalia evidente. Entre as duas reparações são detectados vários impactos.



Figura 7.28 – Resultados da inspecção por *Shearography* pós reparação num componente de aeronáutica

7.4.3 – ENSAIOS EM ESTALEIRO

O autor esteve envolvido, no âmbito do projecto europeu CANDIA de I&D da Comissão Europeia, num conjunto de ensaios, realizados em estaleiro, com o objectivo de testar as capacidades de detecção de vários sistemas de Controlo Não Destrutivo que têm vindo a ser descritos nesta tese. Estes decorreram durante 4 dias nas instalações da *Dassault Aviation* em *Merignac, Bordéus*, empresa que integrava o consórcio responsável pela realização deste projecto europeu. Nestas instalações são realizadas as operações de montagem final dos aviões de combate *Mirage 2000* e *Rafale*, bem como dos aviões *Falcon*.

A *Dassault* disponibilizou para estes ensaios uma aeronave *Mirage 2000* do tipo bombardeiro de 2 lugares. Na figura 7.29 pode ver-se o avião utilizado na realização dos testes bem como o hangar onde decorreram os ensaios. Foi assim possível avaliar as capacidades das técnicas ópticas de controlo não destrutivo, neste caso a *shearography*, num ambiente industrial e sobre uma aeronave real.

Os ensaios relativos às técnicas de *shearography* focalizaram-se no leme de direcção e empenagem, zonas estruturais fabricadas em material compósito.



Figura 7.29 – Avião de ensaio Mirage 2000 num hangar das instalações da Dassault Aviation.

Nestes ensaios dois sistemas foram avaliados: o sistema LTI4000 baseado na interferência de dois pontos vizinhos através de um biprisma de Hung e um sistema desenvolvido pela Universidade de Delft, Holanda, baseado no cálculo de fase em tempo-real. Este sistema revelou-se pouco eficiente para esta aplicação. Utiliza uma reduzida área de inspecção e manifestou uma elevada sensibilidade a perturbações exteriores. Na figura 7.30 pode ver-se a célula óptica do sistema com o díodo laser em primeiro plano e o resultado obtido na detecção de um defeito. Este sistema, devido ao seu fraco desempenho, acabou por não ser utilizado na inspecção do avião.

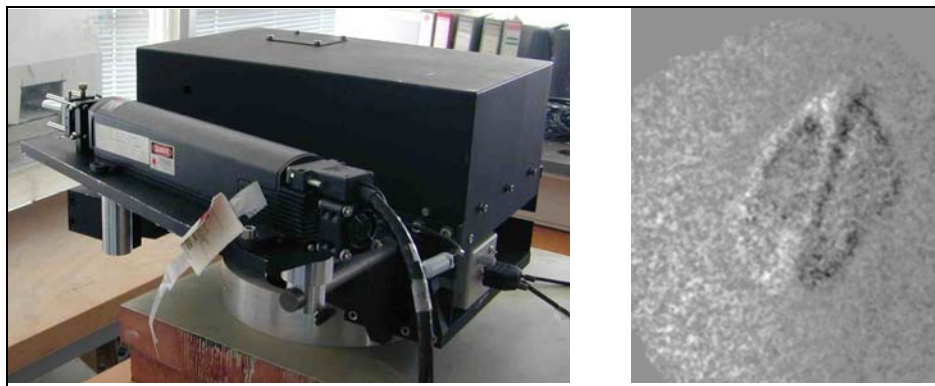


Figura 7.30 – Sistema de *shearography* U. Delft e resultado sobre um defeito de descolamento

Os resultados apresentados em seguida referem-se apenas ao sistema LTI4000 utilizado pelo autor. Este sistema, dada a sua portabilidade e reduzida sensibilidade às vibrações permitiu a sua colocação em cima de uma plataforma, como se mostra na figura 7.31. A estimulação da estrutura, em CFRP, foi realizada através do aquecimento produzido por uma lâmpada de halógeno de 500 W como pode ser observado na fotografia do lado direito que integra a figura 7.31.



Figura 7.31 – Configuração de inspecção utilizada para controlar o leme de direcção da aeronave Mirage 2000.

Uma vez que o sistema de detecção se encontra pousado numa plataforma de reduzidas dimensões o sistema de processamento de imagem teve que ser colocado no solo. Nesta configuração a análise das imagens era feita alguns segundos após a estimulação térmica. O facto de se tratar de um componente em CFRP, material que tem uma condutividade térmica relativamente baixa, permite que a observação das imagens se faça cerca de 10 s após o fim da estimulação. A inspecção do leme de direcção vertical não revelou nenhuma anomalia. Para validar os ensaios, foi então proposta a análise da empenagem, estrutura em CFRP, numa zona onde se suspeitava da existência de um defeito. Esta estrutura está representada na figura 7.32.

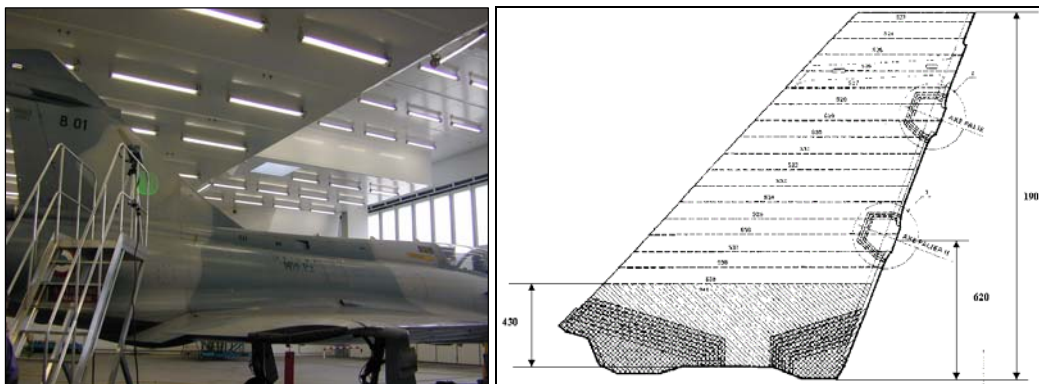


Figura 7.32 – Inspecção da empenagem vertical e desenho esquemático do tipo de estrutura.

A zona em questão evidenciava uma anomalia de forma que era visível a olho nu. Esta anomalia, que aparentava ser apenas um problema de pintura revelou-se ser um defeito de delaminação. A figura 7.33 pode ver-se a concavidade da superfície que localizava a área defeituosa.

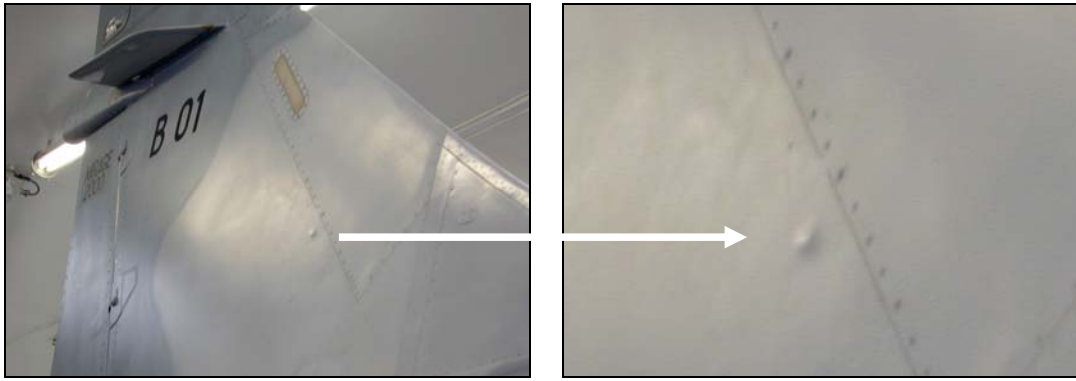


Figura 7.33 – Zona da empenagem que apresentava um defeito visível a olho nu.

A inspecção da zona em questão foi realizada com os três métodos de detecção sem contacto presentes nestes ensaios:

- i) *Shearography* em tempo-real;
- ii) Termografia *Lock-In*; (aquecimento sinusoidal)
- iii) Laser US (Ultra sons excitados por impulsos de laser ultra-curtos).

Os resultados são apresentados e comentados em seguida.

- i) A *shearography* permitiu obter um conjunto de resultados, a diferentes estados de carregamento da estrutura, que revelam a existência de delaminações a diferentes profundidades. Assim, na figura 7.34, a 1ª imagem revela a delaminação da estrutura na zona defeituosa visível a olho nu. Alguns segundos mais tarde uma outra zona delaminada começa a definir-se, como se observa na 2ª imagem. Esta zona, a uma profundidade maior é revelada mais claramente nos instantes seguintes, como se observa na 3ª imagem. Nesta podem ainda ser observadas mais duas delaminações.

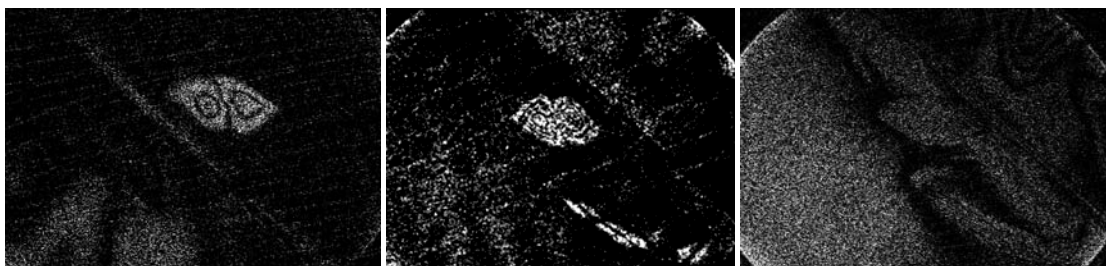


Figura 7.34 – Imagens de *Shearography* obtidas a diferentes estados de deformação da estrutura. Os defeitos próximos da superfície são os primeiros a ser postos em evidência.

- ii) O sistema de termografia *Lock-in* foi operado utilizando a plataforma utilizada na inspecção por *Shearography*, como se pode ver na figura 7.35 O sistema permitiu confirmar a anomalia existente, no entanto, esta apenas foi claramente posta em evidência na zona mais próxima da superfície. Os defeitos mais profundos são ligeiramente visíveis na parte inferior da imagem.

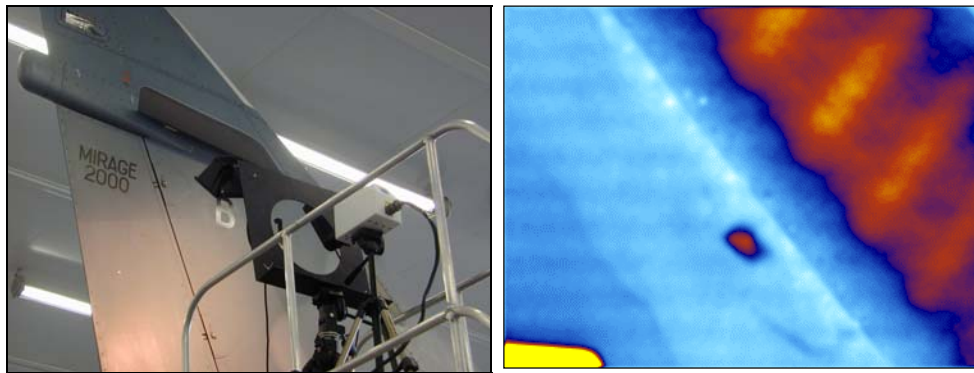


Figura 7.35 – Sistema de termografia *Lock-in* da empresa CEDIP e resultado da análise.

- iii) A tecnologia laser ultra-sons foi utilizada como se apresenta na figura. 7.36. De notar que este tipo de tecnologia necessita de um laser de elevada energia, neste caso um laser de CO₂ que não se vê na figura, para gerar um impulso capaz de criar uma onda de ultra sons na massa da estrutura. Esta onda é em seguida detectada através de um outro laser, Nd:YAG, numa configuração de interferómetro de Fabry-Perot. Os resultados obtidos são de elevada qualidade e revelam o potencial desta técnica. A inspecção é realizada por varrimento da zona circundante do defeito. Na figura 7.36 são apresentados os mapas de amplitude e de tempo de voo. Os dois mapas apresentam claramente as zonas defeituosas e confirmam os resultados obtidos pela *shearography*.

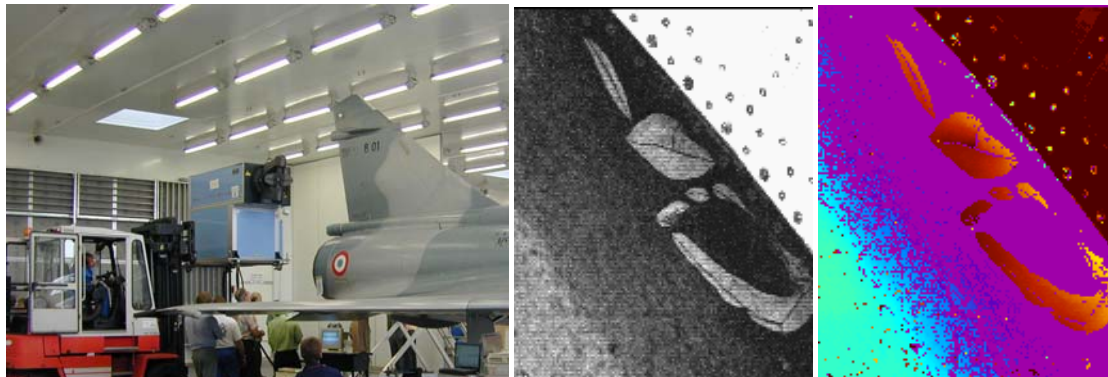


Figura 7.36 – Parte do sistema de inspecção LUIS (*Laser Ultrasound Inspection System*) e resultados obtidos na zona da empenagem circundante ao defeito visível a olho nu.

Embora esta técnica tenha permitido obter resultados de elevada qualidade como os que se mostram esta técnica necessita de um equipamento muito volumoso e difícil de manusear.

Os ensaios realizados no âmbito do projecto CANDIA permitiram obter um conjunto de resultados de elevada qualidade em termos da aplicação da técnica de *shearography* em ambiente de manutenção aeronáutica [11]. Este programa confirmou os resultados de programas anteriores de I&D na área do

desenvolvimento de métodos ópticos de detecção de defeitos, como foi o caso dos programas EUCLID e PDHS. Certos aspectos foram melhorados, sobretudo os referentes à utilização intuitiva dos modos de funcionamento e os aspectos referentes à utilização de um sistema laser num ambiente de manutenção. Este tipo de inspecção torna-se assim, mais *user friendly* e mais fácil de ser utilizado nos centros de manutenção das companhias aéreas, por operários sem formação específica.

7.4.4 – REDACÇÃO DE UM PROCEDIMENTO DE INSPECÇÃO

O passo seguinte na direcção da utilização frequente da *Shearography* pela indústria aeronáutica passa pela integração da técnica nos manuais de inspecção do avião (Non Destructive Testing Manuals – NTM). Paralelamente a técnica tem que ser apresentada de forma positiva às companhias aéreas para que uma futura utilização levante o mínimo de reticências, mesmo não tendo estas a última palavra.

Se a integração no NTM depende sobretudo de respostas positivas a questões técnicas, em termos da capacidade de detecção de defeitos impostos pelos gabinetes de projecto, a resposta a questões mais práticas mas não menos pertinentes do tipo: robustez dos aparelhos, isolamento EM, peso, possibilidade de ser utilizado por técnicos pouco qualificados em óptica, número de operadores necessários, tempo de imobilização exigido à aeronave, necessidade de tratamentos de superfície, forma de aceder às estruturas a inspecionar, tipo de trabalho que pode ser realizado em paralelo na aeronave, ... é privilegiada pelas companhias aéreas.

O tão almejado objectivo da integração de um procedimento de inspecção de aeronave baseado na *Shearography* só recentemente foi alcançado. A introdução no NTM Concorde de um “Procedimento de inspecção” baseado na *Shearography* é uma realidade desde 2002. É com a descrição deste trabalho, desde a fase de pré-estudo até à integração do NTM de um “Service Bulletin” relativo à inspecção por *Shearography* dos *elevons* Concorde, que se conclui este capítulo.

A figura 7.37 representa a localização dos *elevons* nas asas da aeronave Concorde desenvolvida por um consórcio franco-britânico durante a década de sessenta do século passado. Como se pode ver na figura trata-se de uma aeronave que possui uma configuração algo invulgar, mesmo comparada com as aeronaves actuais. Tendo o Concorde uma forma de asa em delta são os *elevons* que cumprem a função aerodinâmica de lemes de profundidade.

O problema

Em meados de 1999 o gabinete de projecto da Airbus France lançou-se à procura de um método de inspecção suficientemente global e fácil de utilizar capaz de detectar pequenas quantidades de água no interior das estruturas tipo *elevon* Concorde. Esta preocupação correspondia também a preocupações da parte das companhias aéreas que exploram o Concorde, que pretendiam detectar as zonas de corrosão o mais cedo

possível. Paralelamente a estas preocupações a DERA produziu um relatório onde se fazia referência à necessidade das companhias aéreas se dotarem de meios controlo capazes de cartografar um problema e de acompanhar a sua evolução.

A *shearography* apareceu assim aos olhos do gabinete de projecto da Airbus France como o método capaz de dar resposta a estas duas necessidades.

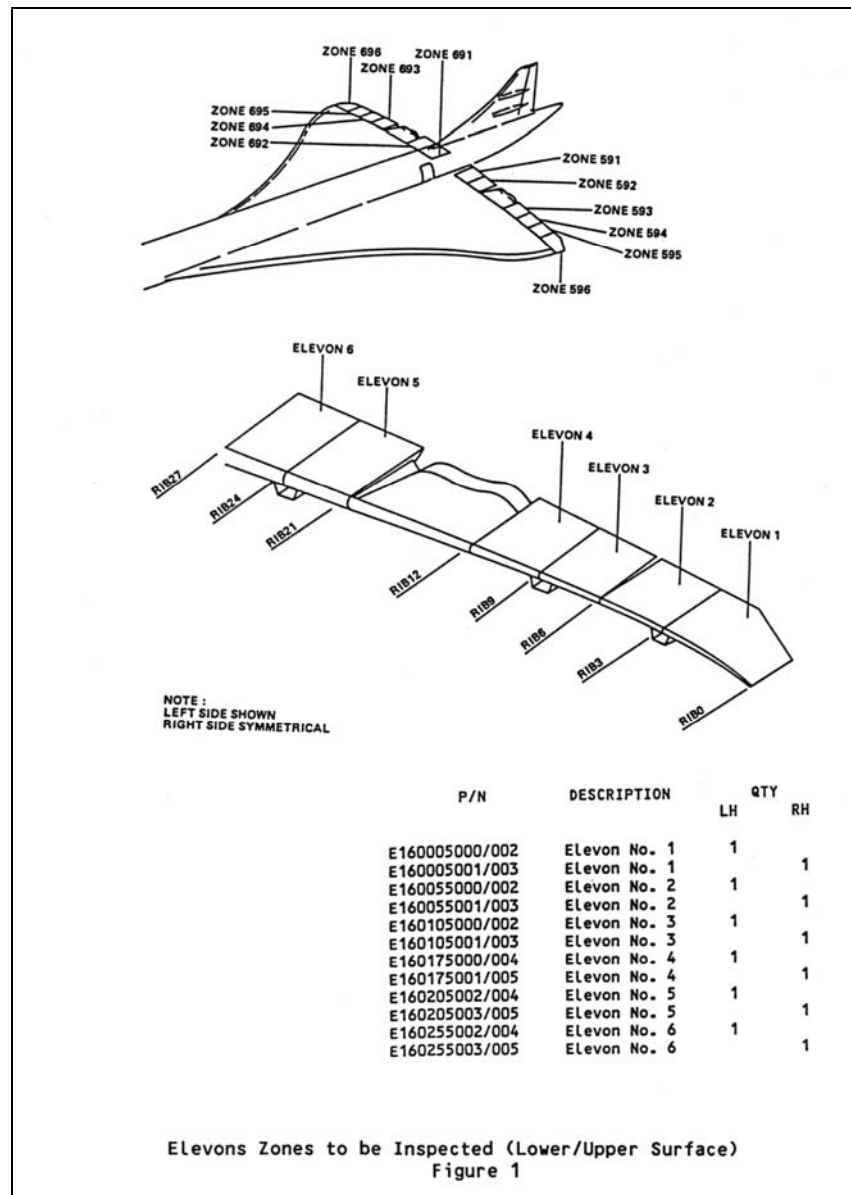


Figura 7.37 – Localização dos *elevons* na aeronave.

A causa

As estruturas do tipo *elevon* Concorde são estruturas *sanduíche*, envelhecidas, com o núcleo em ninho de abelha metálico (alumínio) e com as peles em alumínio.

Durante a fase de aterragem da aeronave, se esta atravessa as nuvens, como a estrutura se encontra a uma pressão inferior, vai aspirar a humidade. Esta humidade vai-se infiltrar através de defeitos existentes nas juntas, que têm uma elevada permeabilidade higroscópica. A partir deste ponto duas possibilidades de propagação podem ocorrer:

- Por capilaridade, a água progride através do adesivo pele/núcleo até encontrar uma zona de fissuração e concentrar-se.
- Através de fissuras existentes na colagem das células do ninho de abelha a água progride até ficar aprisionada.

Esta segunda hipótese é aquela que será a mais provável pois em termos estatísticos a probabilidade de fissuração do adesivo pele/núcleo em várias localizações adjacentes é reduzida. Assim a acumulação da água deve ter origem na má colagem das células que compõem o ninho de abelha da estrutura.

A estrutura

Os *elevons* são elementos móveis que se encontram localizados nas extremidades das asas. Estes servem de sistema de estabilização horizontal. A estrutura de um *elevon* Concorde é do tipo *sanduíche*. O interior é em ninho de abelha metálico (alumínio) e a pele também é em alumínio. A espessura da pele não é constante em todo o *elevon*. As zonas críticas (*leading edge* e controlo hidráulico) apresentam uma maior espessura. O mesmo se passa nas zonas de reparação. Para além da variação de espessura os *elevons* têm dimensões que variam nas duas direcções de um para outro e mesmo a forma varia à medida que nos afastamos da fuselagem.

Na figura 7.38 apresenta-se uma representação do *elevon* 1, lado esquerdo. Este *elevon* é o que apresenta a maior variação de forma. Na figura, a sombreado representa-se as zonas de maior espessura.

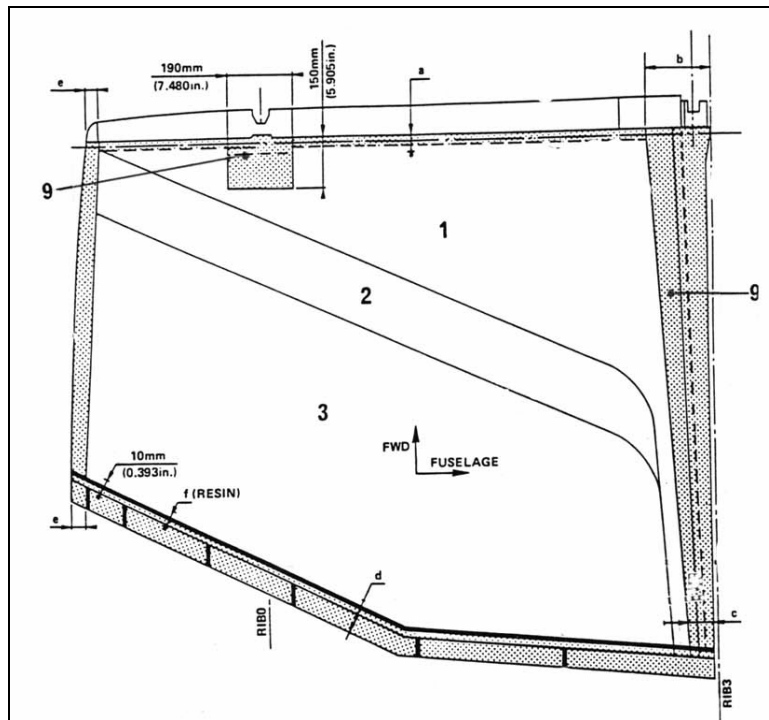


Figura 7.38 – Elevon 1GX, as zonas de maior espessura estão representadas a sombreado.

A qualificação dos operadores

A qualificação da técnica de *shearography* até à sua implementação nos manuais NTM fez-se durante 3 etapas principais:

- Ensaios em peças de referência (defeitos simulados), realizados nas instalações da NDT Expert;
- Ensaios nas oficinas de reparação (defeitos reais e artificiais), realizados nas instalações da Airbus Nantes;
- Ensaios em avião (defeitos reais), realizados nas instalações da Air France Industries e, mais recentemente, nas instalações da British Airways.

Cada uma destas fases de qualificação é avaliada pelo gabinete de projecto e engenharia da Airbus France.

Os primeiros ensaios, realizados em peças de referência, serviram para estabelecer a estimulação por calor como aquela que melhor induz o aparecimento à superfície do objecto em estudo de deformações relacionadas com defeitos internos (descolamentos e presença de água). A estimulação por depressão não gera um carregamento suficiente na estrutura para revelar os defeitos exigidos pelo gabinete de projecto e a estimulação por vibração é inadequada para revelar zonas de presença de água no interior da estrutura.

A estimulação por calor sendo a de mais fácil utilização é, no entanto, aquela que gera imagens de maior dificuldade de interpretação. Esta é a razão pela qual o controlo dos parâmetros de estimulação deve ser levado ao extremo de forma a que o operador do sistema, geralmente sem formação adequada em óptica, quando aplicar o procedimento de inspecção possa executar o controlo por *Shearography* sem dificuldades de maior.

O aumento da temperatura da estrutura por aquecimento é dependente da espessura das peles dos *elevons*. Assim a determinação de um tempo de aquecimento exacto e de uma distância precisa para cada tipo de *elevon* e para cada zona de espessura diferente não é a forma mais simples de operar. A determinação duma taxa de aparecimento de franjas é a forma mais simples que o operador tem de avaliar a correcta estimulação da estrutura.

Os resultados desta primeira fase de trabalho levaram o gabinete de projecto a decidir-se pela avaliação do método em situação quasi-real, nas oficinas de reparação da Airbus France em Nantes. Estes ensaios prolongaram-se por vários meses (com a interrupção forçada durante o inquérito às causas do acidente do Concorde F-BVSC). A avaliação permitiu confirmar a técnica de *Shearography* como a mais indicada para a detecção de descolamentos e presença de água. Na figura 7.39 apresentam-se 3 imagens dos ensaios realizados em Nantes, em que o sistema é posto à prova nas mais diversas configurações.

O resultado destes ensaios, para além da componente de detectabilidade dos defeitos exigidos, permitiu também avaliar de forma positiva o método, em termos facilidade de operação e de manuseamento do equipamento, num ambiente de trabalho realista. De notar que as perturbações ambientais, que os métodos de interferência de *speckle* tanto receiam, não se fazem sentir nesta configuração, pois a inspecção realiza-se sobre imagens de intensidade e não de fase.

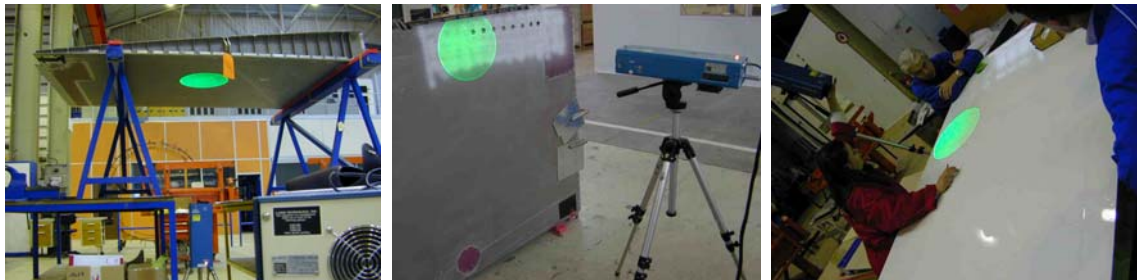


Figura 7.39 – Diferentes fases dos ensaios de validação da *Shearography*.

Estes ensaios permitiram também começar a ver a técnica como capaz de detectar corrosão descolamentos metal-metal, controlo de reparações e mesmo fendas no ninho de abelha.

A terceira e última fase do processo de qualificação da *shearography* como método de controlo dos *elevons* Concorde realizou-se nos hangares da Air France no aeroporto CDG. A figura 7.40 apresenta duas imagens da inspecção referentes uma à zona superior do *elevon* e a outra à parte inferior. Esta fase permitiu definir certos aspectos do controlo que até aqui não tinham sequer sido tidos em conta: a definição das zonas de varrimento, a escolha dos pontos de referência para a utilização da quadricula de inspecção, a escolha da plataforma de inspecção, ...



Figura 7.40 – Inspecção shearografica em condições reais dos Elevons.

Após a realização com sucesso desta campanha de ensaios foi decidido pelo gabinete de projecto que a *Shearography* integrasse os manuais de controlo não destrutivo (NTM – Non destructive Testing Manual) do Concorde.

A primeira fase desta integração consistiu na descrição da técnica de forma a integrar o capítulo 51 (descrição geral das técnicas de controlo não destrutivo). De referir que a *shearography* já faz parte do capítulo 51 do NTM B777. é pois provável que a técnica esteja a ser alvo de avaliações de forma a integrar, como técnica alternativa, certas inspecções não destrutivas do B777.

A fase seguinte refere-se directamente à redacção do “*service bulletin*” 57009 para o controlo, em *shearography*, dos *elevons*. Estes são descritos no capítulo 57 do NTM. O primeiro documento, *revision 7*, incluía um procedimento de inspecção com o objectivo de detectar a presença de água no interior do ninho de abelha e de descolamentos pele/ninho de abelha. Neste documento é descrito o tamanho da indicação mínima a detectar, definido pelo gabinete de projecto da Airbus durante a primeira fase de avaliação da técnica. É este valor que permite definir as áreas máximas de inspecção, pois dada as superfícies dos *elevons* (entre 3 e 6m²) um varrimento é necessário. Outro parâmetro importante é o tamanho do *shear* pois vai ter uma influência sobre a taxa de aparecimento das franjas.

Da oficialização da *revision 7* à necessidade de fazer evoluir o documento até uma *revision 8* foi um passo. A *revision 8* já incluía a detecção de corrosão, o controlo de reparações, os descolamentos metal/metal e os descolamentos até 50mm no interior da estrutura. As imagens da figura 7.41 apresentam os vários tipos de defeitos que podem ser detectados pela *Shearography* neste tipo de estruturas. A forma de os discriminar é quase sempre baseada na definição/nitidez/contraste das franjas (ex. Água VS descolamento) e no tempo de aparecimento das indicações.

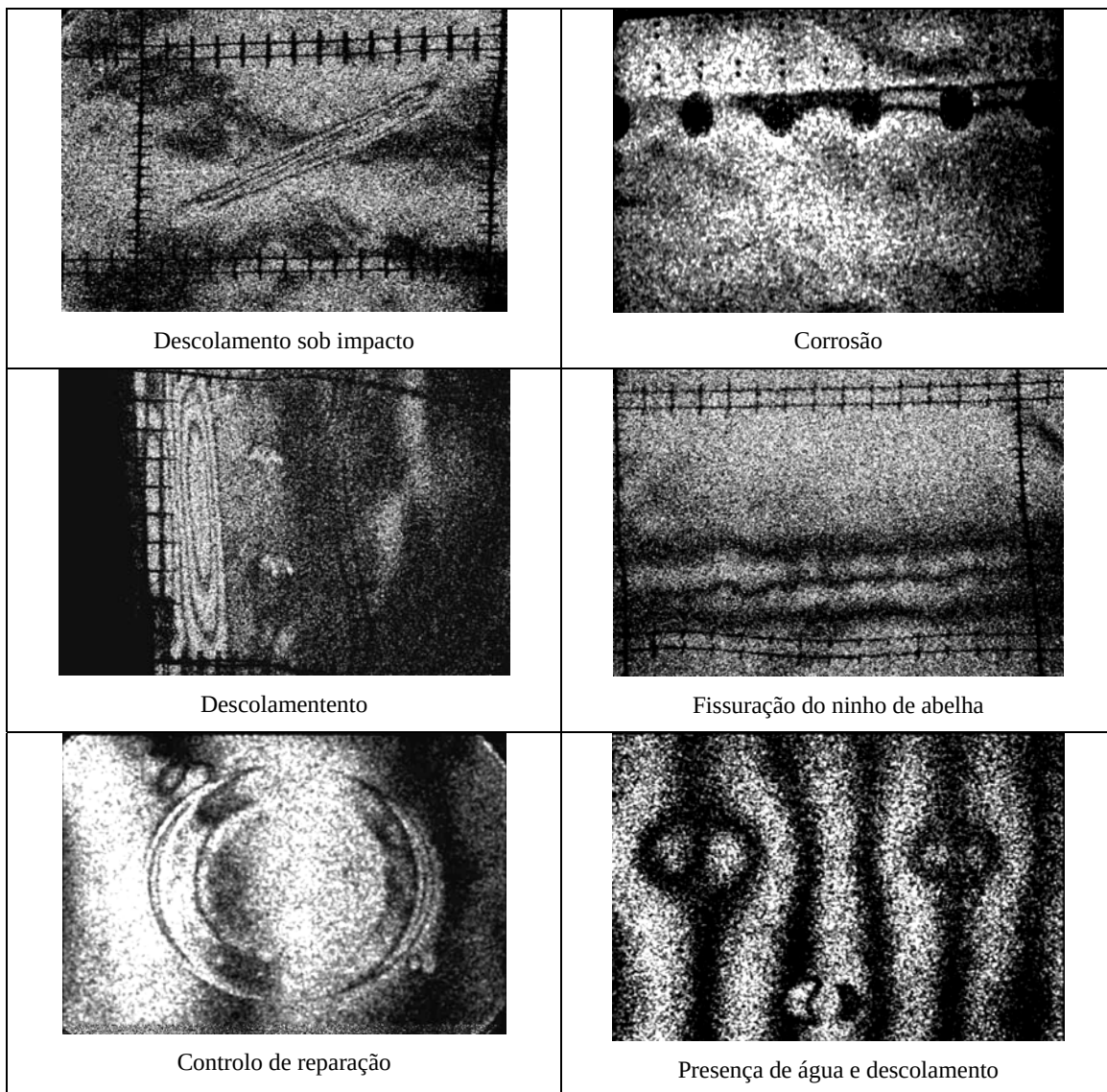


Figura 7.41 – Imagens típicas de defeitos em estruturas do tipo *elevon* obtidas em amplitude.

Dos resultados das inspecções dos aviões da Air France pode concluir-se que a grande maioria das indicações são indicações de descolamento, originadas por fissuração do adesivo após impacto. Estes são causados pela projecção de pedras durante as fases de aterragem e descolagem e ocorrem sobretudo nos *elevons* 5 e 6.

Em Fevereiro 2003 foi aprovada a *revision 9* deste SB55009. Esta revisão permite a utilização de sistemas de *shearography* baseados no cálculo de fase. O aparecimento de sistemas comerciais capazes de serem utilizados em ambientes industriais, como o LTI5100 e o Ettemeyer Q800, levaram a que novos ensaios fossem realizados com estes equipamentos. A figura 7.42 representa o sistema Q800 a ser utilizado na inspecção de um *elevon*. Este tipo de sistema é utilizado solidário com a estrutura a inspeccionar.



Figura 7.42 – Sistema de shearography Q800 em utilização na parte inferior de um *elevon* e imagem de fase.

A última etapa deste processo de transferência tecnológica da *Shearography* em manutenção consistiu na banalização da sua utilização através da formação das equipas CND da Air France que irão usar esta técnica. Como todas as tecnologias emergentes a *Shearography* teve um acolhimento algo reservado no seio da comunidade do CND das oficinas de manutenção da Air France. Com efeito, o conceito de medida é diferente do das outras técnicas habitualmente empregues no CND aeronáutico e um trabalho de formação e pedagogia é necessário para persuadir os operadores e os seus responsáveis a utilizar a *Shearography* [12]. Com o objectivo de tornar progressivamente autónomos os operadores, diferentes níveis de formação foram organizados:

- Formação teórica sobre a técnica
- Formação prática sobre a técnica
- *On Job Training* em estruturas reais
- Inspecção das aeronaves.

Hoje o projecto de implantação da técnica da *shearography* no seio das actividades de manutenção aeronáutica da Air France é uma realidade.

Paralelamente um sistema de certificação oficial, regulamentado pela COFREND (CONfederação FRancesa de Ensaaios Não Destrutivos), para as técnicas de Interferometria de *Speckle* está em curso de elaboração.

Os frutos deste primeiro projecto já estão a aparecer. Nestes últimos meses o gabinete de projecto da Airbus France acompanhou dois estudos sobre o controlo de *karmans* do Concorde através da *Shearography* e o controlo das portas do trem de aterragem.

Os *karmans* são peças de importância estrutural reduzida. São os *karmans* que fazem a ligação aerodinâmica entre as asas e a fuselagem. Um procedimento de inspecção para a detecção de descolamentos e controlo de reparações foi já redigido e está em fase de aprovação.

As portas do trem de aterragem foram também alvo de estudos um procedimento de inspecção está neste momento a ser redigido. Estas estruturas, tal como os *elevons* e os *karmans*, são estruturas *sanduíche* com o núcleo ninho de abelha em alumínio e as peles em alumínio. A figura 7.43 representa esquematicamente uma

destas portas. Vários ensaios foram já realizados nas instalações da British Airways. Um procedimento de inspecção para a detecção de descolamentos e controlo de reparações foi já redigido e aprovado.



Figura 7.43 – Controlo de uma porta de trem de aterragem através da *Shearography*.

Após a aprovação destes dois procedimentos de inspecção é de esperar que o controlo através da *Shearography* se estenda rapidamente à cauda e ao leme de direcção do Concorde.

A passagem às aeronaves do tipo Airbus deverá numa primeira fase centrar-se na integração dos NTM como procedimentos de inspecção alternativos.

REFERÊNCIAS

- [1] R.Powell and K.Stetson, “Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction”, *J.Opt.Soc.Am*, Vol. 55, pág. 1593-1598, 1965.
- [2] K.A. Stetson and R.L. Powell, “Interferometric hologram evaluation and real-time vibration analysis of diffuse objects”, *Journal of the Opt. Soc. of America*, Vol. 55, pág. 1694-1695, 1965.
- [3] J.N. Butters and J.A. Leendertz, “Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology”, *Optics and Lasers Technology*, pág. 26-30, 1971
- [4] J.A. Leendertz & J.N. Butters, “An image-shearing Speckle Pattern Interferometric Technique for measuring bending moments”, *J. Physics E: Scien. Instr.* Vol. 6, pág. 1107-1110, 1973.
- [5] F. Santos, M.Vaz, “ Shearography with pulsed lasers”, *IRF’99*, Porto, Portugal, 19-22 Julho 1999.
- [6] G. Pedrini, Y. Zou and H. Tiziani, “Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method”, *Pure and Applied Optics*, Vol. 5, pág. 313-321, 1996.
- [7] S. Parker, P. Salter, “A novel shearography system for aerospace non-destructive testing”, *Proc. Instn. Mechanical Enginnering*, Vol. 213, Part G, pag. 23-33
- [8] F. Santos, “Utilização das técnicas de interferometria laser para o controlo não-destrutivo de materiais compósitos”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.
- [9] F. Santos, M. Vaz, J. Monteiro, “A new set-up for pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures”; *Optics and Lasers in Engineering*; Vol 42; Issue 2, pág. 131-140; August 2004
- [10] J.P. Jullien, “Les micro-ondes comme méthode de contrainte pour la shearographie et thermographie”, *Relatório interno de estágio*, NDT Expert, 2001
- [11] CANDIA “Cost reduction by Advanced Non Destructive Inspection of Aeronautical structures”, relatório final, projecto BRITE EURAM, BE95-1778, Outubro 2000.
- [12] F. Santos e N Fournier, “La shearographie en maintenance aéronautique”, *Congresso da Sociedade Francesa de Óptica*, Saint-Aubin de Médoc, 18-22 de Novembro, 2002.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

8.1 – Conclusões	8.2
8.2 – Desenvolvimentos futuros	8.5

O capítulo 8 encerra esta tese com a apresentação das conclusões. Os resultados mais importantes são sumariamente expostos juntamente com a interpretação pessoal do autor. Finalmente, os caminhos futuros para novos desenvolvimentos na área das técnicas de Interferometria de Speckle são sugeridos e apresentados os progressos tecnológicos que poderão contribuir para a sua realização.

8.1 – CONCLUSÕES

Várias áreas do conhecimento experimentaram um enorme progresso no final do século passado. De entre elas, a Ciência dos Materiais, foi talvez aquela em que esse crescimento foi mais acentuado, sobretudo ao longo das últimas décadas. Novos materiais foram desenvolvidos e novas aplicações apareceram para materiais já conhecidos. Contudo, foi o desenvolvimento dos materiais compósitos o que mais contribuiu para a revolução verificada principalmente no que diz respeito às novas aplicações em Engenharia. A capacidade de produzir materiais com características adequadas a cada aplicação permite a construção otimizada de componentes estruturais.

Estes componentes, apresentando características intrínsecas específicas, nem sempre podem ser correctamente avaliados recorrendo aos métodos clássicos de análise experimental de tensões. Apresentando uma estrutura heterogénea, estes materiais, possuem frequentemente defeitos no seu interior, quer provocados pelos processos de fabrico, que resultantes da sua vida em serviço. As suas propriedades mecânicas podem ser redistribuídas de acordo com as características que se desejam para os componentes e são bastante diferentes das conhecidas para os materiais convencionais. Por tudo isto aumentou a necessidade de dispor de novas técnicas de Mecânica Experimental que permitam não só auxiliar as tarefas de projecto como também facilitar as operações de inspecção.

Nesta tese foram apresentadas várias soluções que se complementam e podem contribuir para a resolução deste problema. A possibilidade de utilizar, sem contacto e com resolução submicrométrica, sistemas de medida capazes de determinar a deformação global de uma dada estrutura, quer em solicitação estática, quer solicitada dinamicamente foi avaliada. Esta avaliação recorreu à utilização dos sistemas desenvolvidos em aplicações pertinentes da Mecânica Experimental, como é o caso da análise dinâmica, modal e de transientes, e do controlo não destrutivo de componentes estruturais.

Ao longo deste trabalho foram desenvolvidos novos sistemas ópticos orientados para a realização de ensaios dinâmicos e para a inspecção não destrutiva de componentes fabricados com os novos materiais. Especial

atenção foi dada à aplicação de novos algoritmos de processamento e análise de imagem necessários ao tratamento expedito da enorme quantidade de informação obtida com estas técnicas.

Como nas aplicações dinâmicas não é possível recorrer às técnicas temporais de cálculo de fase foram utilizadas técnicas baseadas na introdução de uma frequência portadora nos padrões de interferência. Desta forma é possível obter cálculos de fase a partir de um só registo holográfico ou, de um só interferograma, consoante se utilize o padrão de franjas primário ou secundário como ponto de partida. Das medições realizadas pode concluir-se que o primeiro método, utilizando uma portadora nas franjas primárias, revelou ser bem adaptado às exigências dos ensaios dinâmicos em Mecânica Experimental. Apresenta uma maior gama dinâmica de medida e permite obter mapas de fase com baixo ruído.

Quando o cálculo de fase é baseada na introdução da frequência portadora no padrão de interferência secundário, é necessário isolar espacialmente o sinal da medida e recorrer a algoritmos baseados no cálculo de FFTs para obter os mapas de fase. Embora neste caso se possa utilizar um interferograma como ponto de partida este método é muito mais sensível ao ruído de *speckle*, apresenta uma gama dinâmica menor e implica uma maior interferência do utilizador no processo de cálculo. Uma série de medições experimentais foi levada a cabo com ambas as técnicas no sentido de avaliar as vantagens e inconvenientes da utilização de cada uma delas.

Neste trabalho é também descrito um conjunto de resultados obtidos no estudo do comportamento dinâmico de alguns componentes, tais como: um altifalante, partes de um motor de automóvel e uma pá de uma turbina de gás. Todos estes ensaios foram realizados com uma montagem que introduz uma portadora espacial nos padrões de interferência primária. Dado que neste caso é necessário utilizar fontes de luz pulsada foram testados dois lasers de impulsos como fontes de radiação coerente: um laser de Rubi de duplo impulso e um laser de Nd:YAG de dupla cavidade. Os dois sistemas laser utilizados têm diferentes modos de operação e necessitam de diferentes sistemas de sincronismo pelo que foi necessário desenvolver duas montagens distintas que partilham alguns equipamentos.

A facilidade de utilização do sistema baseado no laser de Rubi é flagrante pois o sistema laser é muito mais simples e no estudo de fenómenos dinâmicos o controlo dos tempos de atraso entre os diferentes componentes é feito de forma mais natural. Neste caso é o evento a estudar o *master* do sistema de sincronismo enquanto no caso anterior é o laser que impõe a temporização. Quando o LOME, em 2001, decidiu adquirir um novo laser de impulsos adaptado ao estudo de fenómenos dinâmicos estes resultados foram determinantes na selecção do laser de Rubi.

No entanto, esta tese teve como base de trabalho a configuração baseada no então único laser pulsado do LOME, o laser de dupla-cavidade de Nd:YAG. Este sistema laser permitiu construir um sistema de medida que, apesar de exigir a construção de um dispositivo de controlo temporal mais difícil de operar, apresentou resultados de grande qualidade, como se pode ver no estudo da pá de turbina de um motor de propulsão a jacto. Neste estudo foram obtidos padrões de interferência secundária de elevado contraste a partir de pares de frentes de onda provenientes de cavidades distintas. A elevada correlação entre os valores obtidos para os

modos de vibração determinados através da Interferometria de *Speckle*, da velocimetria Doppler e da simulação por elementos finitos prova também o rigor da medição.

Esta tese, transversal em termos dos temas que abarcou (óptica, electrónica, lasers, materiais, ensaios não destrutivos...), necessitou de uma grande colaboração entre o autor e os diferentes investigadores do LOME. Em relação à base deste trabalho não só um estudo detalhado dos lasers de impulsos foi primordial mas também o estudo das câmaras vídeo compatíveis com este tipo de fonte luminosa foi imprescindível. Só assim foi possível escolher acertadamente os sistemas de medida adequados aos fenómenos dinâmicos a estudar.

A opção por sistemas de aquisição completamente digitais não se revelou, na altura, a melhor escolha. Na realidade, a incompatibilidade entre certas placas de aquisição e as câmaras digitais revelaram mais inconvenientes do que vantagens na implementação dos sistemas de medida. Este facto ocorreu quando se tentou utilizar a câmara digital KODAK Megaplug E1.0, então novidade no mercado, com a placa de aquisição de imagem MATROX Pulsar. A operação com tal sistema fez-se à custa de diminuir a janela de leitura (1000x800 em vez de 1010x 1010) e de vários meses de conversações com os fabricantes para que desenvolvessem os *drivers* e cabos de conexão adequados a esta utilização.

Nesta fase da tese o sistema comercializado pela SONY revelou-se mais eficaz. Esta câmara faz uso de uma memória auxiliar para poder realizar a dupla-aquisição assíncrona de imagens às elevadas velocidades de aquisição exigidas. Desta forma podem registar-se pares de imagens espaçadas temporalmente de alguns micro segundos. Este equipamento é baseado em tecnologia analógica e não apresentou os inconvenientes do sistema digital então disponível. É convicção do autor que a maior parte dos problemas revelados pelo sistema digital já estão devidamente ultrapassados o que permitirá actualmente optar por uma tecnologia bastante mais promissora.

No que diz respeito aos sistemas de controlo não destrutivo os desenvolvimentos apresentados nesta tese, nomeadamente os referentes à utilização de um interferómetro de Mach-Zehnder para a detecção de defeitos, são de elevada qualidade. Foi demonstrado que este tipo de sistema pode ser uma alternativa aos sistemas de *shearography* baseados nas configurações mais clássicas de Hung e Michelson. Além disso este sistema é, tanto quanto o autor conhece, o único que permite obter cálculo de fase a partir de registos obtidos com lasers pulsados. Assim, a realização de um sistema compacto de *Shearography* baseado no interferómetro de Mach-Zehnder poderá ser uma das direcções de estudo, visto que os resultados obtidos nesta tese em aplicações dinâmicas são muito promissores.

Foi apresentado neste trabalho o desenvolvimento de dois sistemas de *Shearography* sendo um deles utilizado com lasers de emissão contínua e o outro pode ser operado com lasers pulsados. Ambos os sistemas permitem medições quantitativas, isto é, realizam o cálculo da distribuição espacial de fase dos interferogramas.

Durante a realização desta tese e por razões que se prendem com a sua vida privada, o autor saiu do grupo de investigação do LOME e passou a integrar os quadros técnicos da empresa NDT Expert. Nesta nova função foi incumbido da realização de trabalhos de inspecção não destrutiva em componentes de aeronáutica, tema

já desenvolvido na sua tese de mestrado e também integrado no âmbito do presente trabalho. Desta forma foi possível enriquecer esta dissertação com um conjunto de aplicações industriais de algumas das técnicas ópticas que foram desenvolvidas e, ao mesmo tempo, com a experiência adquirida na utilização de sistemas comerciais.

No âmbito da sua nova actividade foi o autor envolvido num conjunto de ensaios realizados em estaleiro para inspecção de alguns componentes do avião Concorde. Os primeiros ensaios realizados, pioneiros na inspecção desta aeronave com técnicas ópticas, permitiram concluir serem estas técnicas suficientemente sensíveis para detectar um conjunto de defeitos que aparecem com alguma frequência nos componentes em causa. Os principais componentes inspeccionados foram os diversos *elevons* que integram as asas deste avião.

Na parte final do 7 capítulo desta dissertação é apresentado o estudo que levou a que a *Shearography* integrasse os manuais de manutenção de uma aeronave comercial – o Concorde. O resultado deste estudo, em que o autor teve uma participação importante, permitiu a integração da *Shearography* no NTM Concorde, e a sua descrição é a melhor conclusão possível para este trabalho. Finalmente provou-se de forma real que as técnicas ópticas podem ser utilizadas em ambientes de elevada instabilidade como é o caso dos ambientes de manutenção aeronáutica. Provou-se também que apesar da complexidade associada aos conceitos teóricos que fundamentam estas técnicas a utilização por pessoal menos qualificado é possível e que as vantagens da implementação destes sistemas são uma realidade. Do conjunto de vantagens resultantes da utilização da *Shearography* podem destacar-se as seguintes:

- Medição global;
- Ausência de contacto com os componentes;
- Elevadas sensibilidade e resolução;
- Utilização em diferentes materiais;
- Permite detectar diferentes tipos de defeitos;
- Observação dos defeitos em tempo-real;
- Acompanhamento da evolução dos defeitos;
- Possibilidade da criação de uma base de dados, sendo os resultados obtidos sob a forma digital.

8.2 – DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Apesar dos desenvolvimentos apresentados nesta tese, referentes à construção de sistemas de Interferometria de *Speckle*, terem sido coroados de êxito, a sua compreensão teórica permite otimizar a sua utilização. Investigações em diferentes direcções podem e devem ser realizadas. A metodologia em torno dos ensaios realizados com estas técnicas, no que diz respeito ao tipo, duração e intensidade da solicitação, bem como o

desenho dos sistemas ópticos (flexibilidade, robustez, preço, ...) podem ainda sofrer grandes evoluções. Finalmente, a investigação de base é absolutamente necessária para a extensão dos limites de operação destas técnicas e para otimizar os diferentes parâmetros de operação.

A confirmação do que acaba de ser afirmado pode obter-se no 5º Programa Quadro de R&D da Comissão Europeia em curso que contempla o financiamento de estudos sobre a *Shearography*. Estes estudos, incluídos no projecto INCA, estão a ser levados a cabo pela SAAB/CSM, BAe Systems, ALENIA, EADS e NDT Expert.

O passo seguinte na diversificação das utilizações desta técnica é a expansão das suas aplicações à gama de aviões Airbus. Na condução desta tarefa a bom termo, dois caminhos se apresentam:

- i) O primeiro consiste na solicitação por parte das companhias aéreas British Airways e Air France (que a utilizam com sucesso no Concorde) da introdução de procedimentos de inspecção alternativos em partes estruturais dos Airbus. O facto dos resultados obtidos no Concorde serem bons facilitará, com certeza, esta opção.
- ii) O outro caminho consiste na reintrodução dos ensaios de validação pela Airbus. O novo ano de 2003 contempla o financiamento de dois estudos com vista a validar a *Shearography* na inspecção de alguns componentes de aviões fabricados pelo consórcio Airbus, nomeadamente o novo A380. Este estudo está a ser realizado em paralelo pela NDT Expert no que se refere aos *ailerons* A380 e pela Airbus Deutschland no que se refere aos painéis de fuselagem em GLARE®. Os primeiros são uma estrutura *sandwich* CFRP/espuma e os segundos um laminado híbrido entre folhas de alumínio e fibra de vidro.

Na opinião do autor a maior divulgação destas técnicas de inspecção, passa pelo desenvolvimento de sistemas de Interferometria de *Speckle* modulares, com a possibilidade de integrarem diferentes níveis de complexidade (inspecção CND em manutenção até ao ensaio de materiais em fadiga, por exemplo). Dados os trabalhos actualmente em curso em breve essa divulgação será uma realidade. Só assim estas técnicas, embora bastante dispendiosas porque os sistemas são complexos, poderão baixar o seu custo e aumentar o seu potencial de mercado.

Os resultados obtidos em instalações industriais demonstram a capacidade dos sistemas de holografia digital pulsada serem utilizados numa vasta gama de aplicações. A combinação de CCD e de lasers de impulsos abre novas portas à Interferometria de *Speckle* (Holografia-TV e *Shearography*). As áreas de estudo visadas são inúmeras: visualização do campo de deformação de componentes automóveis, visualização de vibrações, visualização de ensaios estruturais, ensaios não-destrutivos, visualização da propagação de ondas de choque, etc.

Os últimos entraves aos métodos tradicionais de Interferometria Holográfica desapareceram com a substituição das placas holográficas e dos filmes termoplásticos pelas câmaras CCD. Os primeiros resultados obtidos mostram que as limitações actuais para a sua introdução diária a nível industrial são o tamanho dos lasers e as características dos CCD's. Apesar dos avanços constantes da tecnologia laser é ainda difícil

encontrar lasers de impulsos que permitam a utilização em sistemas de interferometria industriais: o comprimento de coerência, os custos e o atravancamento são alguns dos pontos a melhorar.

Por outro lado existe um elevado potencial de vantagens na utilização futura de CCD's. Em breve estes detectores deverão permitir a aquisição de imagens com maior resolução, quer em termos de digitalização de intensidade, quer na digitalização espacial. Uma maior sensibilidade à radiação permitirá também o estudo de objectos de maiores dimensões. As novas arquitecturas de CCD emergentes, baseadas em elementos C-MOS, permitirão aumentar significativamente a versatilidade dos CCD's de última geração. Assim, estes novos CCD's permitirão para além da digitalização de imagem, que cada pixel possa ser programado individualmente. Este facto permitirá aumentar a gama dinâmica de medida do sistema interferométrico e diminuir a sua dependência da qualidade da iluminação. A iluminação já não necessitará de ser uniforme em toda a imagem pois uma correcta programação do ganho individual de cada pixel poderá compensar eventuais variações de intensidade. Este conceito, totalmente novo, permitirá o aumento da eficiência dos sistemas ópticos e a sua aplicação ao estudo de novos problemas.

Por fim deve acrescentar-se a possibilidade de efectuar medições quantitativas com estas técnicas a partir da utilização de sistemas de processamento de imagem no tratamento da informação. O desenvolvimento de técnicas e algoritmos vocacionados para a obtenção de mapas de fase permite calcular de forma expedita a distribuição espacial de deslocamentos obtida em cada registo. Também nesta área será desejável que sejam introduzidos alguns progressos. A utilização de *hardware* dedicado em associação com circuitos electrónicos específicos e *software* apropriado poderão permitir a realização destes cálculos em tempo-real. Meios de cálculo mais poderosos poderão também desempenhar um importante papel na interpretação da enorme quantidade de informação que fica disponível em cada medição. Espera-se que num futuro próximo fiquem disponíveis novos programas numéricos para de forma mais rápida e clara facilitar a utilização desta técnicas por qualquer operador com um mínimo de formação específica neste domínio.

Alguns passos têm sido dados nas direcções que acima se sugerem sendo actualmente possível dispor de sistemas comerciais, baseados na utilização destas técnicas, que permitem obter as três componentes dos deslocamentos de uma superfície. Os processos de calibração automática dos sistemas bem como os algoritmos de cálculo estão já disponíveis e testados. Na parte final do programa PDHS a equipa do LOME esteve envolvida no desenvolvimento de processos de calibração automática para o sistema de medida que é actualmente comercializado pela empresa Ettemeyer e que foi desenvolvido durante esse projecto.

ANEXO A

Levantamento de forma 3D de uma pá de turbina e análise modal por elementos finitos

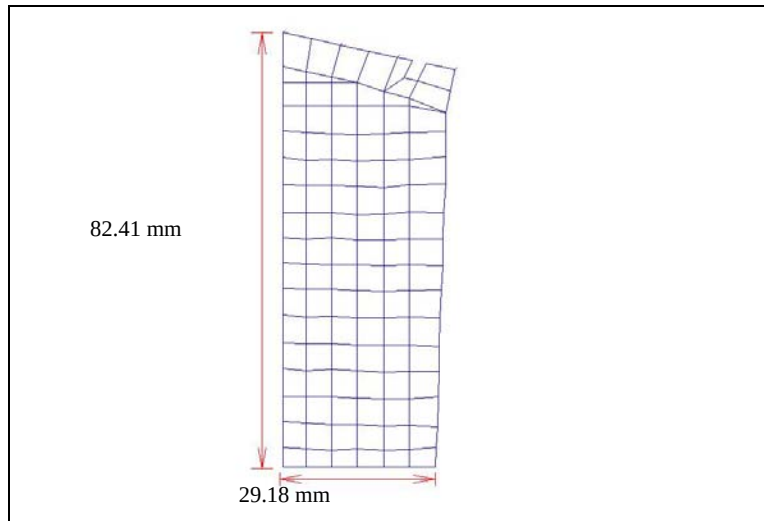


Figura A1 – Malha de elementos finitos representativa da pá de turbina.

Muitos problemas em análise dinâmica de estruturas não podem ser resolvidos por métodos analíticos. As técnicas numéricas permitem que corpos ou estruturas com geometria complicada e que envolvam fenômenos físicos complexos como resposta à ação de solicitações externas possam ser estudados. As técnicas numéricas devem, neste caso, ser capazes de produzir soluções aproximadas à solução exacta com uma suficiente precisão.

Um dos métodos numéricos mais eficientes na análise dinâmica de estruturas é o método dos elementos finitos. A utilização desta técnica obriga de uma forma geral à execução de três etapas fundamentais:

- (1) *Divisão do todo em partes*; permite a representação de domínios geometricamente complexos como conjuntos de um número finito de subdomínios geometricamente mais simples, nomeadamente segmentos de linha. A isto chama-se discretizar o domínio. Cada subdomínio é designado por elemento finito e ao conjunto de elementos chama-se malha de elementos finitos. Os elementos são ligados uns aos outros em pontos que se designam por nós.
- (2) *Estabelecimento das equações de equilíbrio do elemento*; Cada elemento finito, sendo parte do domínio que constitui um corpo deve obedecer a uma dada lei matemática que governa o seu comportamento físico.
- (3) *Montagem (ou espalhamento) das equações de equilíbrio dos elementos*; a ideia é simples e tem como base a imposição da compatibilidade nodal entre elementos. Este requisito estabelece que todos os elementos adjacentes a um dado nó têm que ter o mesmo deslocamento nesse nó. Sob o ponto de vista físico, a imposição da compatibilidade nodal equivale a juntar rigidamente os elementos ou “peças” que constituem a malha de elementos finitos utilizada como aproximação do domínio.

No problema actualmente em estudo, a primeira etapa, o processo de discretização do todo em partes, foi levada a efeito de modo experimental. Com efeito, este procedimento consistiu na obtenção das coordenadas espaciais do modelo que se pretendia estudar. Para isso, sobre o sólido volumétrico (pá da turbina) foi desenhada uma malha cujo objectivo era discretizar um conjunto de pontos do sólido materializados pelas suas coordenadas espaciais, ver figura A2. É óbvio que decorrente do maior ou menor grau de refinamento da malha se obtém um modelo mais ou menos aproximado ao sólido contínuo. No nosso caso cada nó dista do anterior ~5 mm.

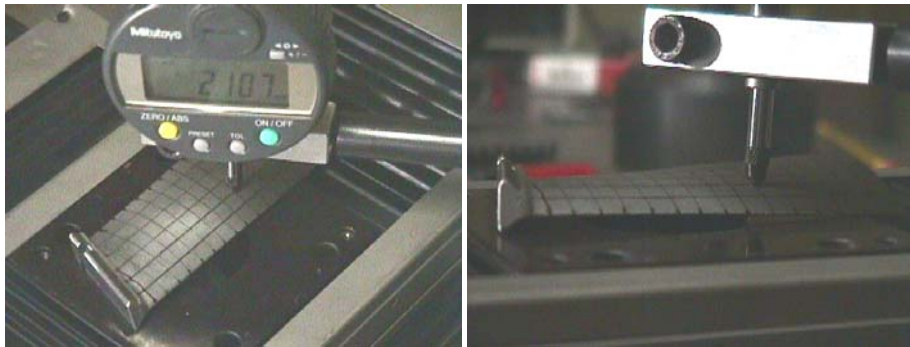


Figura A2 -

Para a execução experimental desta etapa utilizaram-se duas mesas de translação (*MicroControl* com resolução de 0.01mm) que serviam de apoio à pá de turbina que se movia solidariamente com estas. Este movimento permitia a um comparador digital do tipo LVDT, fixo a um ponto tomado como referência e com direcção perpendicular à superfície do sólido, varrê-la em duas direcções ortogonais X-Y, ver figura A3. A utilização do LVDT permitiu obter com rigor ($\pm 1\mu\text{m}$) a terceira coordenada espacial do sólido.



Figura A3 – Montagem experimental e controlo das mesas de translação para o levantamento de forma
O resultado da obtenção das coordenadas espaciais do sólido numa malha 3D representa-se na figura A4.

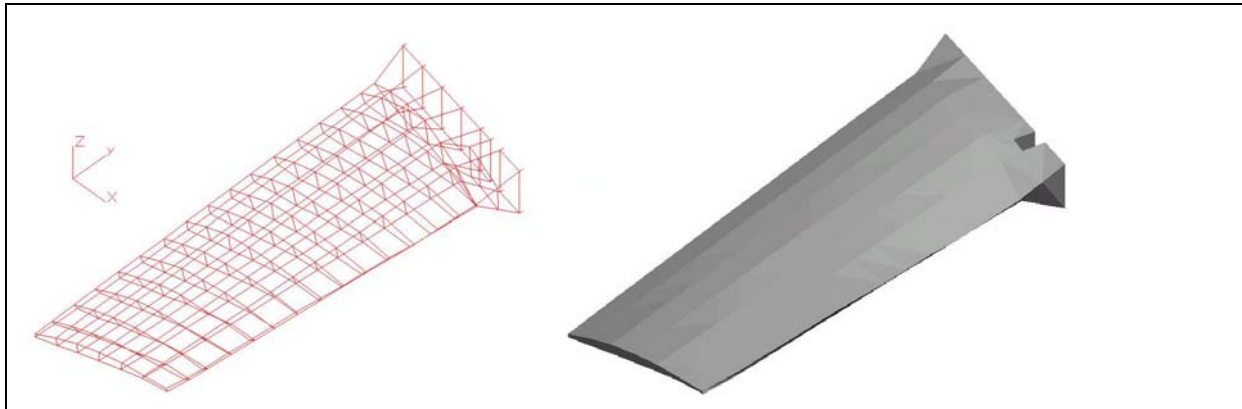


Figura A4 – Vista isométrica da malha de elementos finitos

Esta malha compreende **101 elementos** volumétricos e um número total de **250 nós**. Para além destes números deve ser tido em conta que houve necessidade de discretizar o volume da pá em secções mais reduzidas. A malha gerada é tridimensional e os elementos que a constituem são elementos volumétricos do tipo – *Type 25 Brick Elements*, segundo a designação do ALGOR, tendo cada elemento 8 nós.

Estrutura da malha de elementos finitos

Número de elementos por secção	6
Número de secções	15
Comprimento total de cada elemento	Variável, resultante do levantamento de forma

O material constituinte da pá é uma liga de Níquel - Cobalto. As respectivas propriedades mecânicas e dimensões do componente são dadas nas tabelas seguintes:

Propriedades mecânicas

Densidade	$\rho = 8890 \text{ Kg/m}^3$
Módulo de elasticidade	$E = 200 \text{ E}^9 \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0.3$

Dimensões

Maior comprimento	82.41 mm
Largura na extremidade	29.18 mm
Espessura	Variável ao longo da largura e do comprimento

A segunda etapa consiste no estabelecimento das equações de equilíbrio do elemento de sólido. Com efeito, as grandezas físicas que estão envolvidas e condicionam o comportamento dinâmico de um corpo ou de uma estrutura sob a acção de uma solicitação exterior, são as forças elásticas que dependem da rigidez da

estrutura e as forças de inércia que dependem da sua massa. Para além do conhecimento do tipo de forças envolvidas quando se solicita a estrutura em estudo é necessário conhecer também o tipo de condições de fronteira na *interface* entre dois meios contínuos. Assim, como a pá seria solicitada experimentalmente numa situação próxima de um encastramento o bordo mais espesso da pá foi impedido qualquer movimento afim de se simular essa condição. Todos os restantes nós foram considerados sem qualquer constrangimento (livres).

Foi então efectuada uma análise modal afim de se extraírem as formas modais e respectivas frequências naturais. O método iterativo utilizado pelo código ALGOR consistiu na iteração por subespaços.

A introdução das condições fronteira na simulação, juntamente com o tipo de solicitação e a transmissão destas informações a todos os pontos de medida fornece um resultado da análise modal como o representado na figura. Nesta imagem observa-se a forma modal correspondente ao segundo modo natural de vibração. A deformação é representada a cores (ver tabela de deslocamentos) e a forma indeformada da pá está representada a branco.

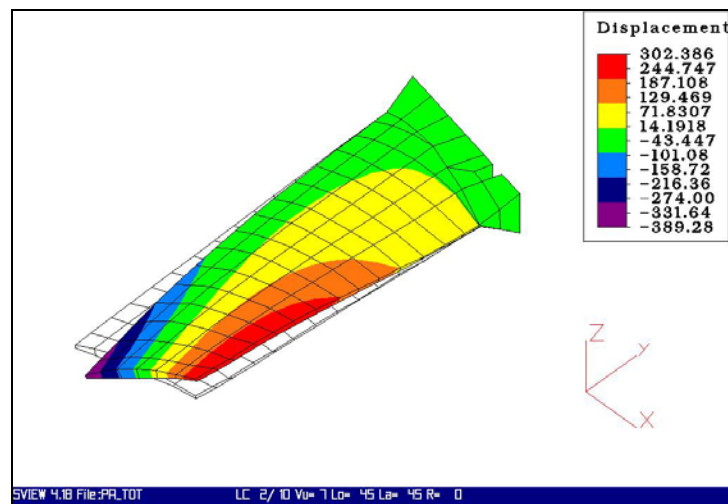


Figura -

