

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Inspeção Visual Automática Para Controlo de Qualidade de Objectos Planos

Rui Miguel Teixeira Cardoso

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientação: Prof. Dr. Armando Jorge Monteiro Neves Padilha

Julho 2008

© Rui Cardoso, 2008

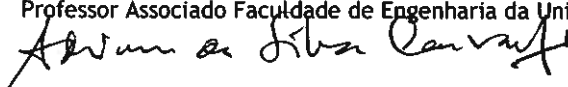
A Dissertação intitulada

“Inspeção visual automática para controlo de qualidade de objectos planos”

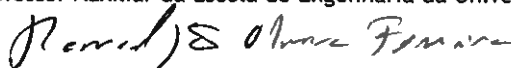
foi aprovada em provas realizadas em 17/Julho/2008

o júri

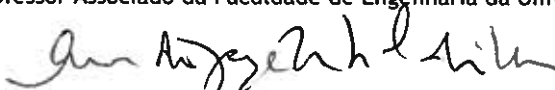
Presidente Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho
Professor Associado Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Manuel João Oliveira Ferreira
Professor Auxiliar da Escola de Engenharia da Universidade do Minho



Professor Doutor Armando Jorge Monteiro Neves Padilha
Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.

Autor - Rui Miguel Teixeira Cardoso



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

“O melhor investimento que se pode fazer é nas pessoas...”

Aos meus pais.

Resumo

Vivemos num mundo em que a concorrência industrial se tem mostrado cada vez mais agressiva na quase generalidade dos sectores económicos. Conseguir níveis de produção capazes de aguentar a pressão da constante entrada de novos produtores no mercado tem-se verificado quase inabarcável. A diferenciação e garantia de elevados níveis de qualidade como base de criação de valor nos produtos, tornou-se numa evidente aposta de muitas empresas. Nessa estratégia, os sistemas de visão artificial têm suscitado cada vez mais o interesse nas mais diversas áreas da automação industrial. Embora não seja uma área de vasto conhecimento comum, existem nos dias de hoje técnicas de algoritmia de processamento de imagem capazes de resolver uma vastíssima gama de possíveis desafios no que ao controlo de qualidade diz respeito.

Em cada caso é necessário estudar qual a característica que se pretende avaliar e como se pode avaliar. Aí entram diversos grupos de técnicas que extraem de uma imagem a informação através de diferentes métodos - análise de cor, análise de textura e análise geométrica constituem os grupos estudados nesta dissertação, a qual se debruça exclusivamente sobre objectos planos. Através de três aplicações são evidenciadas as potencialidades de cada um dos métodos referidos e através de um projecto desenvolvido na Qimonda Portugal S.A. é exemplificada a capacidade de integração dessas aplicações em ambiente industrial com resultados produtivos.

Abstract

We live in a world where industrial competitiveness has been increasingly aggressive in almost all economic sectors. Achieving levels of production able to cope with the pressure of constant entry of new producers in the market has been almost impossible. The differentiation and guarantee of high quality as a basis for creating value in products has become an obvious challenge for many companies.

In this strategy, the systems of artificial vision have attracted increasing interest in the most diverse areas of industrial automation. Although not being a large area of common knowledge, there are in these days algorithmic techniques of image processing able to solve a wide range of possible challenges in quality control.

In each case it is necessary to consider the best feature set to assess quality and the way to extract it from the image data. Several groups of techniques extract from an image the information through different methods - analysis of color, texture analysis and geometric analysis are the groups studied in this dissertation. Three applications highlight the potential of each of the mentioned groups in flat surface objects, and a project developed in Qimonda Portugal SA illustrates the capacity of integrating of these applications in the industrial environment with productive results.

Résumé

Nous habitons un monde dans lequel la compétition industrielle se révèle de plus en plus agressive presque dans tous les secteurs économiques. Atteindre des niveaux de production capables de supporter la pression permanente de l'entrée de nouveaux producteurs dans le marché devient presque impossible. La différenciation et le garant de hauts niveaux de qualité comme base de création de valeur dans les produits sont devenus le pari évident de nombreuses entreprises. Dans le cadre de cette stratégie, les systèmes de vision artificielle suscitent de plus en plus l'intérêt en différents domaines de l'automatisation industrielle. Quoique ce ne soit pas un domaine de grande connaissance commune, il y a actuellement des techniques d'algorithmique de traitement d'image capables de résoudre une très vaste gamme de défis possibles en ce qui concerne le contrôle de qualité.

En chaque cas, il faut étudier la caractéristique que l'on veut évaluer et chercher comment on peut l'évaluer. Là, il y a de différents groupes de techniques qui extraient l'information d'une image à travers de différentes méthodes - analyse de la couleur, analyse de la texture et analyse géométrique constituent les groupes étudiés dans cette dissertation, vis-à-vis leur utilisation pour des objets plats.

À travers de trois applications on met en évidence les potentialités de chacune des méthodes référencées et, à travers d'un projet développé chez Qimonda Portugal S.A., on exemplifie la capacité d'intégration de ces applications en milieu industriel avec des résultats productifs.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Armando Padilha, pela experiência transmitida e pelas palavras concisas e essenciais à elaboração desta dissertação.

Ao Prof. José Carlos Alves por toda a ajuda e tempo disponibilizado para o projecto.

Ao José Carlos Costa, ao André Silva e ao Rui Batista por todo o apoio no projecto e ajuda na integração na Qimonda. A todo o grupo do *End of Line* por me proporcionarem um excelente ambiente de trabalho e de convívio.

Á Cláudia por todo o conforto e carinho que nunca me faltou, e pelo apoio incansável nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais por toda confiança depositada, e pelo sacrifício que fizeram para me proporcionar esta graduação.

Índice

Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Résumé.....	ix
Agradecimentos.....	xi
Índice.....	xiii
Lista de Figuras.....	xvii
Abreviaturas e Símbolos.....	xxiii
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Contexto	1
1.3 Objectivos	3
1.4 Organização da Dissertação	4
2 Sistemas de Visão Industrial	5
2.1 Indústria	5
2.2 Visão Artificial	7
2.3 Técnicas e Algoritmos	8
2.4 Projecto de Sistemas de Visão	9
3 Inspeção de Objectos Planos	11
3.1 Introdução.....	11
3.2 Métodos de Inspeção	12
3.3 Textura	14

3.3.1	Definição de Textura	14
3.3.2	Textura e o Sistema Visual Humano	14
3.3.3	Análise de Textura.....	15
3.3.4	Algoritmos de Análise de Textura	18
3.4	Cor.....	19
3.4.1	Teoria da Cor	19
3.4.2	Análise Computacional da Cor	20
3.4.3	Algoritmos de Análise de Cor	21
3.5	Geometria	24
3.5.1	Inspecção Geométrica	24
3.5.2	Algoritmos de Inspecção Geométrica	26
4	Aplicações	29
4.1	Inspecção de Objectos Planos por Análise de Textura - <i>Inspecção de Qualidade de Couro</i>	29
4.1.1	O Sector dos Curtumes em Portugal	29
4.1.2	A Inspecção de Couro	30
4.1.3	Algoritmo de Inspecção	30
4.1.4	Resultados	35
4.2	Inspecção de Objectos Planos por Análise de Cor - <i>Detecção de Nós em Pranchas de Madeira</i>	45
4.2.1	Indústria Madeireira em Portugal	45
4.2.2	Inspecção na Indústria Madeireira	45
4.2.3	Algoritmo de Inspecção	47
4.2.4	Resultados	54
4.3	Inspecção de Objectos Planos por Análise Geométrica - <i>Detecção de Defeitos em Substratos de Produção de Memórias SDRAM</i>	55
4.3.1	Introdução	55
4.3.2	Algoritmo de Inspecção	57
4.3.3	Resultados	62
5	Implantação Industrial da Inspecção Automática.....	65
5.1	Introdução.....	65
5.2	A Qimonda Portugal S.A. e Visão Geral do Processo de Produção de Memórias SDRAM	66
5.2.1	A Qimonda AG	66
5.2.2	Processo de Produção de Memórias SDRAM.....	67
5.3	Enquadramento.....	69
5.3.1	O Processo de <i>Molding</i>	69

5.3.2	Os Substratos	73
5.3.3	O Problema	74
5.4	Solução Implementada	74
5.4.1	Instalação do Sistema de Inspeção	74
5.4.2	Captura	75
5.4.3	Equipamento.....	77
5.4.4	Sinalização	77
5.4.5	Controlo	78
5.4.6	Processamento	80
5.5	Algoritmo de Inspeção	82
5.5.1	Características Inspeccionadas	85
5.6	Aplicação Gráfica	88
5.6.1	Avisos Gráficos	90
5.7	Resultados	92
5.8	Desenvolvimentos Futuros	97
6	Conclusões	99
7	Referências	101

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Imagem de uma memória com encapsulamento FBGA.	2
Figura 1.2 - Segmento de substrato perfeito (à esquerda) e com defeito de incomplete mold (à direita).	3
Figura 2.1 - Exemplo de aplicação de um sistema de visão industrial - neste caso aplicado a uma linha de montagem de circuitos electrónicos.	6
Figura 2.2 - Inspeção de peças de automóveis através de raios-X (esquerda) e uma imagem capturada por infravermelhos de um circuito electrónico que pode ser utilizado para realizar o controlo de qualidade da eficiência do sistema de dissipação de calor do mesmo (direita).	7
Figura 2.3 – Exemplo de aplicação de um filtro de <i>edge detection</i> . Neste caso utilizado na segmentação de grânulos de chá [26].	9
Figura 2.4 – Exemplo Ilustrativo de um sistema de Inspeção Visual Automático.	10
Figura 3.1 – Imagens obtidas em [13] que ilustram o significado da fase e da amplitude num padrão. A imagem D tem a amplitude de B e a fase de A, e a imagem C tem a amplitude de A e a fase de B.	16
Figura 3.2 – Imagem de um tecido à esquerda e o resultado da amplitude da sua transformada de Fourier à direita.	18
Figura 3.3 – Espectro electromagnético, com realce da gama de frequências correspondentes à zona de.....	19
Figura 3.4 – Gráficos de transformação de imagem, à esquerda alteração de brilho e à direita alteração de contraste	21
Figura 3.5 – À esquerda imagem original, no centro com mais 30% de brilho, à direita com mais 60% de contraste relativamente à original.	22
Figura 3.6 – Exemplo de aplicação de filtros de detecção de orlas: a) imagem original; b) filtro de Sobel; c) filtro de Prewitt; d) filtro de Roberts; e) filtro Laplaciano; f) filtro de Canny.	23
Figura 3.7 – Esquema ilustrativo de uma transformação espacial.	25
Figura 4.1 – Marca identificativa dos couros de qualidade produzidos em Portugal.....	29
Figura 4.2 – Fotografia de uma área de couro a inspeccionar.	31

Figura 4.3 – Resultado da amplitude da Transformada de Fourier aplicado à imagem de couro preto capturada.	31
Figura 4.4 – Imagem do filtro de frequências aplicado ao resultado da Transformada de Fourier.	32
Figura 4.5 – Aplicação de filtro de orientação (entre 0 e 45º) à Transformada de Fourier.	33
Figura 4.6 - Resultado de pré-processamento utilizando o Laplaciano do Gaussiano com uma máscara 33x33 (à esquerda) e com máscara 9x9 (à direita).	34
Figura 4.7 – Resultado do pré-processamento utilizando Filtro de Prewitt ou Filtro de Sobel (à esquerda) e com aumento de contraste de 10% na imagem original antes da aplicação do filtro (à direita).	34
Figura 4.8 – Aplicação de filtro passa-baixo com diâmetro máximo de 5. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e transformada inversa (à direita).	35
Figura 4.9 – Aplicação de filtro passa-banda com gama de diâmetros entre 0 e 20. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e transformada inversa (à direita).	35
Figura 4.10 - Aplicação de filtro passa-banda com gama de diâmetros entre 20 e 50. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e transformada inversa (à direita).	36
Figura 4.11 - Aplicação de filtro passa-banda com gama de diâmetros entre 50 e 80. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e transformada inversa (à direita).	36
Figura 4.12 - Aplicação de filtro passa-banda com gama de diâmetros entre 80 e 110. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e transformada inversa (à direita).	36
Figura 4.13 - Aplicação de filtro passa-banda com gama de diâmetros entre 110 e 150. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e transformada inversa (à direita).	37
Figura 4.14 – Aplicação dos quatro filtros de orientação na transformada de Fourier.	38
Figura 4.15 – Imagens resultado das transformadas inversas de cada um dos filtros.	38
Figura 4.16 – Resultado da aplicação de um <i>thresholding</i> (nível 0,5) às imagens resultado das transformadas inversas, de forma a realçar apenas as zonas de maior relevo.	39
Figura 4.17 – Marcação a azul das zonas realçadas em cada um dos filtros na imagem original.	39
Figura 4.18 – Soma das quatro imagens como forma de ilustração de todas as zonas realçadas.	40
Figura 4.19 – Imagem resultado do pré-processamento (à esquerda) e resultado da transformada de Fourier (à direita).	40
Figura 4.20 – Marcação a azul das zonas realçadas nos quatro filtros de orientação.	41
Figura 4.21 - Imagem resultado do pré-processamento (à esquerda) e resultado da transformada de Fourier (à direita).	42
Figura 4.22 - Marcação a azul das zonas realçadas nos quatro filtros de orientação.	42
Figura 4.23 - Imagem resultado do pré-processamento (à esquerda) e resultado da transformada de Fourier (à direita).	43
Figura 4.24 - Marcação a azul das zonas realçadas nos quatro filtros de orientação.	43
Figura 4.25 - Imagem resultado do pré-processamento (à esquerda) e resultado da transformada de Fourier (à direita).	44
Figura 4.26 - Marcação a azul das zonas realçadas nos quatro filtros de orientação.	44

Figura 4.27 – Fotografia de segmentos de madeira, produto de venda da indústria da serração.....	45
Figura 4.28 – Fotografia de uma porção de uma prancha de madeira de pinho com nós no canto superior esquerdo.	46
Figura 4.29 – Imagem capturada de um segmento de uma prancha de madeira, utilizada nos testes de inspecção.....	47
Figura 4.30 – Imagem resultado de um <i>thresholding</i> aplicado à fotografia da prancha de madeira com um nível de <i>threshold</i> de 115.....	48
Figura 4.31 – Imagem das sementes dos nós (intensidade <70).....	48
Figura 4.32 – Imagem resultado dos dois varrimentos de <i>Region Growing</i>	49
Figura 4.33 – Imagem com a sobreposição dos 6 níveis de diâmetro, resultando numa gradação da cor conforme a dimensão do nó.	50
Figura 4.34 – Imagem resultado do isolamento das zonas de nós com os dois graus mais altos relativos às dimensões dos nós.	51
Figura 4.35 – Resultado da Etiquetagem dos nós isolados.....	52
Figura 4.36 – Imagem original com recorte das zonas dos nós.....	53
Figura 4.37 – Imagem resultado da inspecção. Realce a verde de manchas de corte, a vermelho os nós de grandes dimensões e a amarelo os nós de pequenas dimensões.	54
Figura 4.39 – Imagens de BUMs.	56
Figura 4.38 – O defeito de <i>incomplete mold</i>	56
Figura 4.40 – Representação esquemática do processamento da determinação das posições dos <i>bond channels</i>	57
Figura 4.41 – Representação esquemática do processo de isolamento dos <i>Bond Channels</i> e de realce dos defeitos.	59
Figura 4.42 – Representação esquemática do processo de isolamento vertical e horizontal das posições dos BUMs.	60
Figura 4.43 – Imagem representativa do resultado da detecção de BUMs.	61
Figura 4.44 – Imagem do fluxograma de funcionamento do algoritmo de processamento.	62
Figura 4.45 – Imagem carregada do computador para inspecção.	62
Figura 4.46 – Resultado da procura das marcas identificadoras dos <i>bond channels</i>	63
Figura 4.47 – Imagem dos <i>bond channels</i> isolados.	63
Figura 4.48 – Resultado da inspecção dos <i>bond channels</i>	63
Figura 4.49 – Resultado do isolamento vertical e horizontal na inspecção dos BUMs.	64
Figura 4.50 – Representação final da inspecção dos BUMs.	64
 Figura 5.1 – Imagem de uma <i>Wafer</i> com realce a uma unidade individualizada (<i>Die</i>).	 67
Figura 5.2 – Imagem de substrato com adesivo (elementos à esquerda) e já com o <i>Die</i> colocado (unidades à direita).	68
Figura 5.3 – Imagem de componentes individualizados onde são visíveis as bolas de solda nos contactos.	69

Figura 5.4 – Fotografia de um par de substratos numa <i>Turn Table</i>	69
Figura 5.5 – Fotografia de uma <i>Tool</i> de injeção de <i>mold compound</i> aberta.	70
Figura 5.6 – Fotografia de uma <i>Turn Over</i> com realce de uma <i>cull</i>	70
Figura 5.7 – Fotografia de uma <i>Degating Table</i>	70
Figura 5.8 – Fotografia de uma <i>magazine</i> no interior da <i>Unloader</i>	71
Figura 5.9 – Fotografia do defeito de <i>Incomplete Mold</i>	72
Figura 5.10 – Fotografias do defeito de <i>Mold Bleed</i>	72
Figura 5.11 – Fotografia do defeito de <i>Mold Flash</i>	72
Figura 5.12 – Fotografia de uma unidade com o defeito de <i>Mold Offset</i>	73
Figura 5.13 – Diagrama de blocos do funcionamento do sistema.	74
Figura 5.14 – Câmara DALSA GigE Spyder3 utilizada no projecto.	75
Figura 5.15 – Iluminador de LEDs utilizado.	76
Figura 5.16 – Gráfico representativo dos sinais de controlo de captura da câmara.	76
Figura 5.17 – Torre sinalizadora utilizada.	77
Figura 5.18 – Gráfico representativo dos sinais envolvidos na geração do sinal de controlo de captura.	78
Figura 5.19 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo de controlo de captura.	79
Figura 5.20 – Esquema representativo das entradas e saídas do circuito do bloco de controlo.	80
Figura 5.21 – Esquema representativo das operações e transformações de pré-processamento.	82
Figura 5.22 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo de recepção e processamento de imagens.	84
Figura 5.23 – Amostragem de duas linhas de uma unidade individualizada.	85
Figura 5.24 – Gráfico dos níveis de intensidades dos <i>pixels</i> da unidade da figura 5.23.	85
Figura 5.25 – Gráfico dos níveis de intensidades ao longo de um <i>bond channel</i> sem defeitos e iluminação normal.	86
Figura 5.26 – Imagem de um <i>bond channel</i> capturada pelo sistema de inspeção onde foi detectado o defeito de <i>incomplete mold</i> (imagem rodada de 90°).	86
Figura 5.27 – Gráfico dos níveis de intensidades ao longo do <i>bond channel</i> mostrado na Figura 5.26.	86
Figura 5.28 – Representação das diferenças de níveis de intensidade na janela de análise para um BUM marcado e um BUM não marcado.	88
Figura 5.29 – Aspecto do Interface Gráfico.	89
Figura 5.30 – Resultado do resultado da inspeção de um substrato sem defeitos.	90
Figura 5.31 – Imagem do resultado da inspeção de um substrato com defeitos encontrados na coluna J e na coluna K.	91
Figura 5.32 – Imagem do resultado da inspeção dos BUMs, neste caso com a localização de duas marcas nas posições A4 e A5.	91
Figura 5.33 – Imagem alerta da captura de uma imagem inválida.	91
Figura 5.34 – Resultados da inspeção de marcas de latão. Fotografia tirada ao substrato (à esquerda); Imagem capturada pelo sistema (ao centro); Resultado do processamento de inspeção (à direita).	93

Figura 5.35 – Resultados da inspecção das partículas de <i>mold compound</i> . Fotografia tirada ao substrato (à esquerda); Imagem capturada pelo sistema (ao centro); Resultado do processamento de inspecção (à direita).	93
Figura 5.36 – Fotografia de um substrato com <i>incomplete mold</i> sujeito a teste.....	94
Figura 5.37 – Inspecção do substrato com incomplete mold da Figura 5.37. Imagem capturada (à esquerda) e resultado da inspecção (à direita)	94
Figura 5.38 – Imagens de substratos não inspeccionados devido a marcações a caneta nas marcas localizadoras de <i>bond channels</i> (realce a vermelho das marcas não detectadas).....	96
Figura 5.39 – Encravamento do substrato à entrada da <i>magazine</i> . A câmara permanece a capturar a mesma linha continuamente.	96
Figura 5.40 – Situação de atraso de captura por parte do computador.	96

Abreviaturas e Símbolos

AIMMP	Associação das Indústrias da Madeira e Mobiliário de Portugal
AO	<i>Assembly Operations</i>
APIC	Associação Portuguesa dos Industriais dos Curtumes
BUM	<i>Bad Unit Mark</i>
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
DRAM	<i>Dynamic Random Access Memory</i>
EOL	<i>End of Line</i>
FBGA	<i>Field Ball Grid Array</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FOL	<i>Front of Line</i>
MIEEC	Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
QPT	Qimonda Portugal
SDRAM	<i>Synchronous Dynamic Random Access Memory</i>
TSOP	<i>Thin Small Outline Package</i>

1 Introdução

1.1 Motivação

A utilização de aplicações informáticas para inspecção automática de produtos é actualmente uma clara aposta de um grande número de empresas em todo o mundo, pertencentes a uma já alargada gama de possíveis áreas de trabalho. Neste contexto, a visão artificial tem assumido cada vez mais um papel impulsionador das tecnologias existentes. Esta evolução tem suscitado o interesse dos investigadores em criarem novas soluções, dada a vastidão de possíveis aplicações - há actualmente sistemas de auxílio à produção e de controlo de qualidade inseridos na indústria têxtil, metalúrgica, madeireira, semicondutores, nuclear, alimentar, como outras.

Focando esta análise nos sistemas de controlo de qualidade, a inspecção visual automática é uma das áreas com maior expansão. Este crescimento tem proporcionado soluções cada vez mais inovadoras para a indústria, o que lhes proporciona normalmente melhorias nos índices de produtividade, reforçando assim posições de competitividade no mercado. Embora este trabalho seja, em alguns casos, ainda realizado por humanos, neste confronto as máquinas têm conseguido melhores resultados por serem mais rápidas e totalmente imunes ao cansaço. Em situações demasiado monótonas, demasiado exigentes para a visão humana ou que ponham em risco a saúde dos operários (ambientes radioactivos ou ambientes com contaminação química, por exemplo) os equipamentos que recorrem a sistemas de controlo por visão artificial já são escolhas inevitáveis.

1.2 Contexto

A ideia para este estudo surge da participação do autor num projecto iniciado na disciplina de Sistemas Baseados em Visão, feito em parceria com a Qimonda Portugal S.A.,

fabricante mundial de memórias SDRAM. Este trabalho envolveu o estudo e projecto preliminar de um sistema de inspecção automática de defeitos em substratos após operação de injeção de *mold compound*¹ (operação de *Mold*) em memórias do tipo FBGA². Com esta operação, a produção das memórias inicia a fase de *End of Line*, fase esta que termina no momento em que as memórias já se apresentam em unidades individuais e passam para a fase de testes - *Burn In*.



Fonte: www.qimonda.com

Figura 1.1 - Imagem de uma memória com encapsulamento FBGA.

Na operação de *Molding*, os defeitos podem surgir de diversas formas. A injeção do *mold compound* pode não ser realizada na sua totalidade, resultando no defeito de *incomplete mold*; há também a possibilidade de a injeção ser feita na totalidade, mas com uma orientação errada, o encapsulamento fica colocado ligeiramente ao lado do pretendido, dando origem ao defeito de *mold offset*; podem também ocorrer derrames de *mold compound* para a zona dos contactos, provocando o defeito de *mold bleed*. Os elevados parâmetros de qualidade exigidos pela Qimonda, levam a que as mais pequenas variações na operação resultem em defeitos que justificam a exclusão de produto. No entanto são apresentados nesta dissertação apenas os casos mais relevantes.

Os problemas de *incomplete mold* têm resultados graves. Como consequência destes defeitos as ligações internas entre o *Die*³ e o substrato ficam expostas, o que provoca a inutilização das memórias envolvidas e daí a importância dos defeitos serem detectados de imediato, evitando que mais recursos sejam gastos em memórias com defeito.

¹ Material utilizado no encapsulamento de semicondutores composto essencialmente por resinas *epoxy*.

² A sigla vem de "Fine pitch Ball Grid Array", este é um tipo de encapsulamento utilizado em diversos tipos de chips, em que os pontos de contacto do chip com o módulo são pequenos pontos de solda presentes na parte inferior do mesmo.

³ Elemento da *wafer* já individualizado onde está contido o circuito de memória.

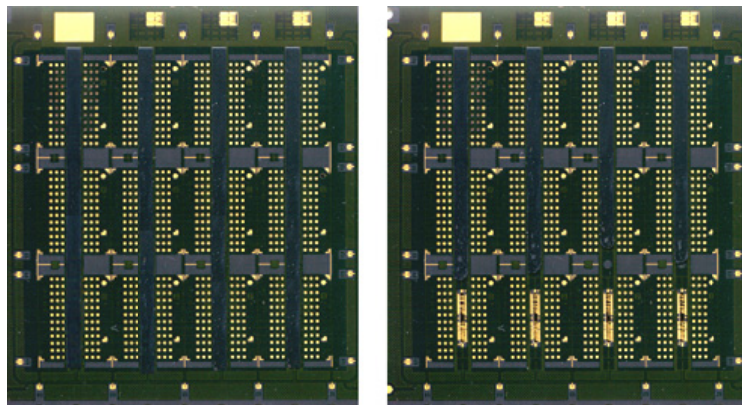


Figura 1.2 - Segmento de substrato perfeito (à esquerda) e com defeito de incomplete mold (à direita).

A análise de objectos planos, domínio no qual se insere este trabalho, é uma das áreas da visão artificial ainda com grande margem de progressão e naturalmente com grande investimento associado. Este será o principal alvo desta dissertação.

1.3 Objectivos

A inspecção visual automática de objectos planos é, neste trabalho, o principal tema de estudo. Será realizada uma revisão bibliográfica da evolução das técnicas utilizadas para aplicações desta natureza, bem como os métodos que actualmente ocupam os investigadores desta área.

Será também realizado um estudo mais prático de aplicações para inspecção de diversos tipos de texturas e padrões, aplicando alguns dos principais métodos estudados. Nesta fase, o projecto que serviu como motivação para a dissertação será incluído e aprofundado.

Pretende-se com este trabalho dar não só uma visão do estado da arte da inspecção visual de objectos planos, bem como confrontar alguns dos métodos existentes de forma a identificar e distinguir as capacidades de cada um.

1.4 Organização da Dissertação

A dissertação começa por abordar, no capítulo 2, os sistemas de visão artificial na generalidade, onde é mostrado o panorama global da integração deste tipo de soluções na indústria, são debatidas as questões relacionadas com a aposta neste tipo de sistemas de inspecção e são explicadas as exigências e requisitos na construção dos mesmos.

No capítulo 3 é feito um aprofundamento teórico e são debatidos os tipos de algoritmia existentes. Com base na revisão bibliográfica são propostos três tipologias de métodos de inspecção: as inspecções por análise de textura, inspecções por análise de cor e inspecção por análise geométrica. Ainda neste capítulo são aprofundados os três grupos referidos e são sugeridos para cada um, alguns métodos e técnicas de análise.

No capítulo 4 são apresentadas as três aplicações realizadas para cada uma das tipologias propostas. É apresentada uma aplicação no controlo de qualidade do couro como representativa dos métodos de análise de textura, uma aplicação de inspecção de madeira ilustrando um exemplo de aplicação de inspecção por análise de cor e uma aplicação de detecção de defeitos em substratos de produção de memórias SDRAM como exemplo de aplicação de inspecção por análise geométrica.

No capítulo 5 é apresentado o desenvolvimento do projecto de engenharia realizado na Qimonda, no seguimento do desenvolvimento da aplicação de detecção de defeitos na produção de memórias SDRAM. São apresentados neste capítulo todas as áreas de trabalho e desenvolvimento exigidas no projecto e implementação do sistema de visão industrial.

No final, são apresentados no capítulo 6 algumas conclusões sobre todo o trabalho realizado.

2 Sistemas de Visão Industrial

2.1 Indústria

A aposta em sistemas de visão industrial não é uma preocupação recente para os mais variados segmentos da indústria. Desde o aparecimento da visão artificial na década de 60, que as aplicações recorrendo a esta tecnologia têm assistido a uma constante progressão nas mais diversas áreas: diagnóstico médico, robótica móvel, vigilância, automação industrial [4]. As potencialidades destas aplicações levaram a que diversas empresas, ao longo dos anos, estudassem a introdução de automatismos de inspecção visual em alguns dos seus processos. Como é descrito em [6], desde o início da década da 80 que empresas de montagem de placas de circuito impresso começaram a usar extensivamente equipamentos de visão artificial para automatizar a montagem dos circuitos.

Inicialmente, as exigências eram diferentes das actuais, haviam naturalmente menores recursos que limitavam em muito a operabilidade destes sistemas. As capacidades com que os equipamentos deste género eram dotados, atribuíram-lhe desde muito cedo responsabilidades não só de controlar a qualidade dos artigos produzidos mas também de auxiliar os sistemas produtivos como elementos de decisão.

A introdução destes sistemas nos módulos de produção (ver figura 2.1) acarreta sempre algum risco de investimento, como abordado em [5], já que esta decisão é essencialmente afectada por factores económicos. A produção de uma empresa está dependente não só da rentabilidade dos operários e máquinas presentes nas linhas mas também dos níveis de qualidade conseguidos nos produtos fabricados. Ao evitar que produtos defeituosos permaneçam em produção a gastar recursos, tempo e espaço para um retorno nulo, há uma contribuição para reduções de custos e minimizações de prejuízos associados. Há ainda a reparar que a melhoria do rácio de produtos perfeitos pelo total produzido traz também vantagens ao nível das vendas. Quanto menos produtos com defeito forem

vendidos, menos queixas haverá por parte dos clientes e melhor reputação da empresa será criada no mercado. Estes factores criam de imediato valor acrescentado aos produtos, mesmo que não haja necessidade de acrescentar custos adicionais ao processo.

Como contrapartida para as vantagens referenciadas, as exigências levam a que as empresas imponham na sua produção inspecções a 100% da produção. No entanto, esta condição obriga a que sejam feitos investimentos. Para empresas cujo volume de produção seja muito elevado, esse nível de inspecção exige proporcionalmente mais recursos. O que inicialmente representava a contratação de mão-de-obra, actualmente pode representar uma aposta em sistemas de inspecção visual automática. Estes são à partida mais-valias por fazer baixar o custo unitário do produto.

Para além dos já falados factores económicos, a empregabilidade é outro elemento que assume bastante responsabilidade e influência na decisão. O balanço tem que ser feito entre os despedimentos provocados pela introdução de alguns destes automatismos nas linhas de produção por substituição directa de operações manuais e a necessidade das empresas obterem para os seus quadros pessoas qualificadas e com formação específica como consequência dos investimentos tecnológicos, como é o caso.



Fonte: www.mikrotron.de

Figura 2.1 - Exemplo de aplicação de um sistema de visão industrial - neste caso aplicado a uma linha de montagem de circuitos electrónicos.

Na maior parte das situações os benefícios dos investimentos em sistemas de visão industrial só são verificados a médio ou longo prazo. Como tal, essas medidas não devem ser tomadas como melhoramentos técnicos mas sim como investimentos a longo prazo que não devem ser avaliados de imediato.

2.2 Visão Artificial

Quando se analisa um sistema de visão artificial, as comparações com a inspecção visual humana são imediatas, e assume-se à partida que os limites serão os mesmos. Isso de facto é uma concepção errada, os humanos têm limitações, por exemplo, a nível do tempo de operação (factor fadiga), da condicionante ambiental (as condições com que lhe é permitido fazer a inspecção influenciam o resultado), a velocidade de processamento (exige tempo para analisar uma imagem) e a não-repetitibilidade de resultados (o mesmo defeito pode levar a decisões diferentes em alturas diferentes). Para os humanos, considera-se impossível detectar 100% dos defeitos, estimando-se que o valor médio máximo se fica nos 70%, [21]. Estas são de facto condicionantes que não influenciam os sistemas de visão artificial, os quais, por sua vez, são limitados em áreas em que os humanos não sentem à partida dificuldades, como as variações de luminosidade, variações no tipo de produto, adaptações ao sistema produtivo, no fundo tudo que lide com a subjectividade. Estes são aspectos que, para quem projecta um sistema de inspecção automática, exigem um estudo cuidadoso no momento do desenvolvimento da algoritmia do processamento.

Relativamente a outros tipos de inspecção, a visão, por se tratar de uma técnica de análise de aparência, está condicionada em medições de algumas características físicas (condutividade, peso, resistência, etc.), embora em algumas delas e em casos específicos se consigam obter por métodos de cálculo indirecto (pode-se obter o peso, quando conhecida a densidade e caso se consiga obter as dimensões/volume de um objecto). Há ainda outras associações, que permitem alargar ainda mais as aplicações da visão artificial e humana e do processamento de imagem, como são os casos de imagens obtidas por infravermelhos, ultra-sons ou raios-X, que permitem expor características não visíveis à partida (ver figura 2.2).

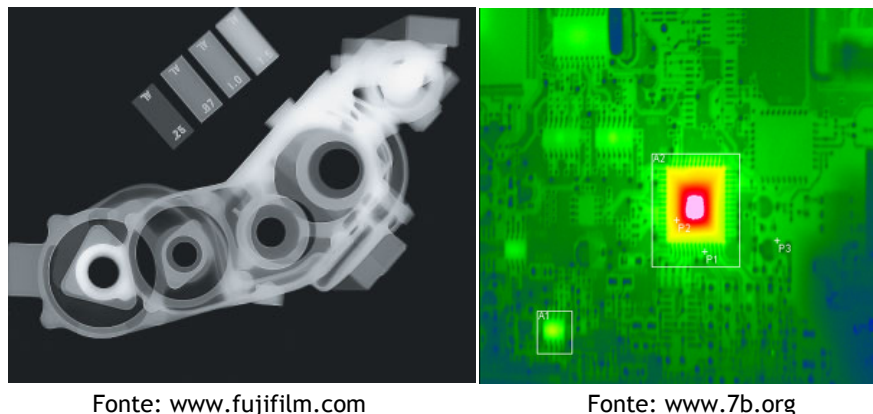


Figura 2.2 - Inspecção de peças de automóveis através de raios-X (esquerda) e uma imagem capturada por infravermelhos de um circuito electrónico que pode ser utilizado para realizar o controlo de qualidade da eficiência do sistema de dissipação de calor do mesmo (direita).

Os sistemas de visão artificial inserem-se de facto numa vasta gama de possíveis soluções para inspecção automática, o que lhes confere uma diferenciação marcada pela flexibilidade.

2.3 Técnicas e Algoritmos

Quando abordamos os métodos de processamento em aplicações de inspecção visual, há uma distinção de alto nível, proposta em [1], que agrupa as técnicas em dois grupos principais. O primeiro grupo utiliza técnicas de medida de grau de correspondência de um objecto padrão com o objecto em análise (*matching*) para verificar o nível de perfeição deste. O segundo grupo recorre à extracção de características do objecto para decidir a partir disso o estado e a condição do produto analisado.

Para o primeiro caso, os algoritmos utilizados baseiam-se todos na correlação (*matching*), podendo variar apenas as condições em que se processam. Esta operação pode ser feita com imagens binárias, em escala de cinzentos ou após decomposição RGB (*Red*, *Green* e *Blue*) e daí que geralmente seja efectuado um pré-processamento de forma a explorar um meio mais favorável à operação e assim maximizar o desempenho da inspecção.

No segundo grupo abordado, a abrangência é maior. A quantidade de técnicas já desenvolvidas, obriga-nos a identificar previamente os aspectos a explorar, para nos permitir posteriormente fazer uma escolha dos algoritmos apropriados a testar. Se se restringir à partida a área de estudo em análise de superfícies, as possibilidades podem ainda assim ser bastante distintas na sua complexidade. A solução mais directa e mais simples será a de *thresholding*, em que a imagem capturada é comparada com um fundo constante que funciona como limiar de decisão entre o que será considerado normal e “anormal”. Esta técnica pode ser adaptada a outros casos com múltiplos níveis de comparação, permitindo assim atribuir níveis intermédios de classificação. Wang e Campbell [22], estimavam que 90% dos defeitos industriais em 1995 seriam detectáveis através de *thresholding*. Esse valor hoje é naturalmente mais baixo, mas ainda assim bastante elevado.

Os filtros de imagem podem também ser utilizados em operações de identificação de características: detecção de fronteiras (*edges*), orientações de linhas, detecção de pontos e gradientes de variação são alguns exemplos disso (ver figura 2.3). Estas operações surgem geralmente associadas ao pré-processamento a aplicar antes de extrair por *thresholding* uma dada característica.

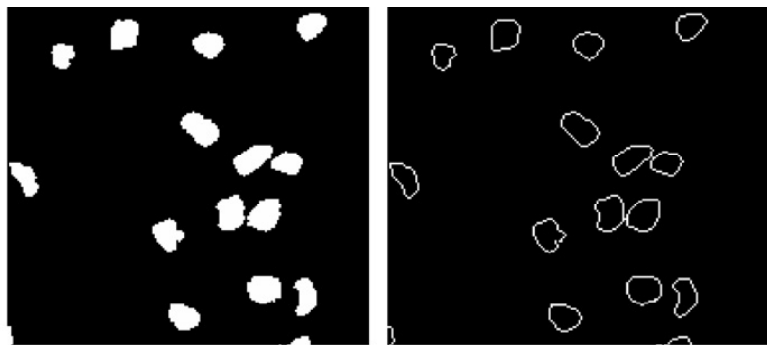


Figura 2.3 - Exemplo de aplicação de um filtro de *edge detection*. Neste caso utilizado na segmentação de grânulos de chá [26].

Para superfícies com relevo são propostas também análises 3-D como forma de estudar com rigor a face exposta e daí poder identificar possíveis defeitos. Estas análises passam por obter informação rigorosa sobre a face 3-D ou apenas indícios sobre o conteúdo 3-D. Como exemplo, é descrito em [1] um dos métodos, onde a face 3-D é obtida por *shape-form-profile*, cujo resultado é apenas um perfil de estrutura e não a face 3-D completa.

A inspecção de superfícies texturadas abrange uma vasta gama de algoritmos, dependendo do tipo de texturas e do que se pretende analisar. Para aplicações desta categoria, é usual utilizarem-se filtros de Gabor, Transformadas de Fourier, análise de níveis de correlação, Transformadas de Wavelet, redes neuronais ou os *Self Organizing Maps*. Parte destes algoritmos serão vistos em mais detalhe mais à frente.

2.4 Projecto de Sistemas de Visão

A instalação de um sistema de inspecção visual automática passa obrigatoriamente por um processo de estudo prévio que se preocupa com questões referentes ao local de instalação, à dinâmica do processo de inspecção e ao objecto a inspeccionar. A figura 2.4 transmite uma visão geral da instalação de um sistema deste tipo.

A nível da instalação, a importância é dada à disposição de equipamentos, à capacidade de tornar o meio num ambiente controlado, ao tipo de iluminação requerida e ao tipo de equipamentos necessários. A dinâmica do processo define os limites a nível do processamento. Quanto mais rápido for o processo de fabrico, menor vai ser o tempo disponível para o processamento da imagem captada e naturalmente mais exigências haverá na escolha do equipamento de processamento (que poderá ser um computador, um DSP ou um FPGA, por exemplo) e no algoritmo de processamento.

A análise do objecto que será alvo de inspecção é a fase que deverá reter mais cuidados e atenção. É importante compreender à partida que tipo de informações é possível obter para transformar esses dados em funções de decisão. Na inspecção de defeitos, por exemplo, antes de qualquer outra coisa, é necessário perceber correctamente o que significa “defeito” em cada situação em particular. Este factor é essencial, para construir um sistema robusto e confiável. Em aplicações de detecção de defeitos, paralelamente à preocupação de criar um sistema capaz de identificar tudo que se associe a defeito, deverá haver também a preocupação de não haver exagero na sensibilidade criada para o sistema, resultando no aparecimento de “falsos alarmes” que podem vir a prejudicar gravemente o sistema produtivo.

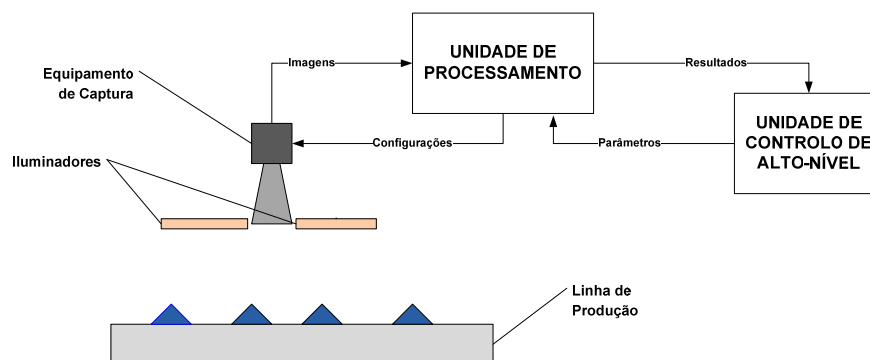


Figura 2.4 - Exemplo Ilustrativo de um sistema de Inspeção Visual Automático

Em [1] é descrita uma sequência de quatro operações no que ao processamento diz respeito. O primeiro passo será a captura digital da imagem, podendo haver a necessidade de fazer a composição da imagem; em casos em que a câmara seja linear há a necessidade de juntar os *frames* capturados numa só imagem. Seguidamente, no segundo passo, deverá ser feito um primeiro processamento da imagem, onde esta é preparada para a fase de extracção de características. Nesta segunda fase é usual utilizarem-se filtros para remoção de ruído, separação de segmentos sem interesse na imagem ou proceder-se a operações de ajuste geométrico da imagem. No terceiro passo é então feita a extracção das características pretendidas. Nesta fase são aplicados métodos de *thresholding* e outras formas de segmentação, como sequência de um pré-processamento de realce das características pretendidas. A quarta e última operação preocupa-se com a classificação dos resultados obtidos na operação anterior e decidir sobre a presença de defeitos na imagem analisada. Em alguns casos, esta decisão é resultado de outras operações feitas com imagens resultantes da operação de extracção de características (podem ser operações de *thresholding*, subtracção de imagens com modelos definidos, ou outros métodos, por exemplo estatísticos).

3 Inspeção de Objectos Planos

3.1 Introdução

A inspecção de objectos planos é uma das áreas com maior aplicação a nível de sistemas de visão industrial. A gama de abrangência dos métodos utilizados confere-lhe versatilidade suficiente para estes serem incluídos em processos de fabrico de papel, madeira, metais, cerâmica, têxteis, peles ou *wafers* de silício.

A detecção de defeitos numa superfície de um objecto plano preocupa-se essencialmente com três aspectos distintos: análise de cor, textura e geometria. Estes três aspectos podem ser usados em complementaridade mas podem também ser usados independentemente num sistema de inspecção. Como suporte, é referenciada em [8] e [3] essa distinção, mas realizada com base apenas em cor (ou uniformidade) e textura.

A análise de cor pode ser utilizada em aplicações onde essa propriedade seja relevante e portadora de muita informação - indústria madeireira, por exemplo. No entanto essa informação nem sempre é relevante ou nem sempre está disponível o que transfere, por exemplo, para a análise de textura parte dos problemas existentes - indústria de papel, têxtil ou de *wafers* de silício, [9]. Nestes casos, as não-uniformidades procuradas encontram-se pela análise da distribuição e orientação dos elementos que formam os materiais. Na inspecção geométrica, o padrão ou regularidade de aspecto é o factor essencial em que se procuram determinadas características onde se espera encontrá-las. Este tipo de inspecção requer, geralmente, ajustes espaciais o que os obriga a recorrer a protótipos como meio de orientação e localização.

A nível de complexidade a análise de cor em superfícies uniformes trata as inspecções mais simples. Como referido em [14], a existência de uma base de comparação aproximadamente constante, permite que em grande parte das aplicações nestas superfícies a detecção dos defeitos seja feita directamente através de *thresholding* ou por *edge detection*. O nível reduzido de processamento exigido e a fiabilidade nos resultados

difundiram desde muito cedo estas soluções em diversos tipos de indústria, como o caso da metalomecânica onde é possível através dos algoritmos referidos detectar arranhões ou rupturas nas superfícies metálicas, ou o caso da indústria madeireira onde os nós nas pranchas de madeira são identificados da mesma forma.

As inspecções por análise geométrica verificam o seu maior nível de complexidade na localização espacial do objecto. Este tipo de inspecção só se pode aplicar quando há grande rigor não só na disposição e orientação do objecto e suas partes constituintes, mas também na sua posição. Para isso, pode recorrer-se a algoritmos de *feature matching*, onde se procura uma dada característica como referência espacial, ou *total matching*, de forma a obter um dado nível de correlação e garantir assim a posição e/ou o nível de perfeição do objecto inspeccionado.

Para a inspecção das superfícies texturadas, devido à natureza da sua aparência, recorre-se geralmente a análise de frequência, seja em amplitude ou fase. A inspecção de peles é um exemplo disso, onde segmentos com textura de distintas frequências são menos desejados por lhe darem uma aparência menos uniforme.

Cada uma destas três metodologias de inspecção será abordada em mais detalhe ainda neste capítulo e no grupo das aplicações, onde é exposta uma aplicação para cada um dos métodos.

3.2 Métodos de Inspeção

A problemática da inspecção de superfícies planas leva-nos hoje a soluções bastante complexas que introduzem, no processamento das imagens, elaborados algoritmos matemáticos. De facto, os estudos nesta área não são recentes e a evolução ao longo dos anos foi trazendo progressivamente poderosas ferramentas de processamento. Como analisado em [20], as soluções mais populares inicialmente baseavam-se na análise de textura directamente sobre os níveis de cinzento da imagem. Haralick, no ano de 1979, apresenta trabalhos com matrizes de co-ocorrência em escala de cinzentos e a função de análise de auto-correlação. Na década de 80, Davis introduz a matriz de co-ocorrência generalizada, Gagalowicz as médias espaciais de segunda ordem, Clark e Bovik a filtragem bi-dimensional no domínio espacial e das frequências e Cross e Jain o modelo estatístico dos campos aleatórios de Markov.

Actualmente a quantidade e variedade de algoritmos e técnicas aplicadas à inspecção das diferentes superfícies, levou à criação de grupos classificados de algoritmos. Kumar, [3] e Mak e Peng, [21] propõem para a análise de superfícies três tipos de aproximações

que resumem as técnicas utilizadas actualmente. São as aproximações estatísticas, espectrais e aproximações baseadas em modelos.

No grupo referente às aproximações estatísticas são identificadas e separadas regiões da superfície a analisar, que apresentem comportamentos estatísticos diferenciados relativamente ao comportamento estacionário de uma superfície sem defeitos. Para este grupo, Kumar [3] lista técnicas como a detecção de defeitos por dimensão fractal, por operações morfológicas, por detecção de orlas, correlação cruzada normalizada, detecção de defeitos através de filtros próprios, por funções de *Rank-Order* e através de redes neuronais.

As aproximações espectrais são mais eficazes em análise de texturas uniformes, onde está presente um certo grau de determinismo na distribuição de padrões. Estas soluções ocupam actualmente uma larga percentagem das utilizadas em aplicações de inspecção de qualidade de superfícies na indústria em geral. Os métodos propostos por Kumar [3] nesta categoria são a detecção de defeitos pela aplicação directa da Transformada de Fourier, pelos Filtros de Gabor, utilizando distribuições de Wigner ou aplicando Transformadas de Wavelet.

O último grupo utiliza métodos de aproximações baseadas em modelos para identificação de defeito. As vantagens destes processos é conseguirem produzir texturas que coincidam com as analisadas. As aproximações por modelos são eficazes em imagens com distribuições estocásticas ou em texturas aleatórias onde as aproximações estatísticas e espectrais são ineficazes. Neste grupo Kumar [3] destaca o método de detecção de defeitos através do Modelo de Campos Aleatórios de Gauss-Markov (GMRF - Gauss Markov Random Fields) e a detecção de defeitos através do Modelo de Poisson.

Em [8], o agrupamento é feito com base nas aplicações, ou seja, são separadas técnicas pelo tipo de superfície texturada. Nessa referência, são estudadas as superfícies regulares e são recomendadas para a sua inspecção as matrizes de co-ocorrência, transformada de Fourier, métodos de *filter-bank* ou os filtros de Gabor.

3.3 Textura

3.3.1 Definição de Textura

A definição de textura não é de todo consensual, diversos investigadores propõem diversas definições. No entanto, de uma forma geral, a textura pode ser entendida como o aspecto de uma superfície, ou a configuração de um ou mais padrões que definem uma imagem específica como se de uma função espacial dependente das intensidades dos *pixels* se tratasse, [15]. Em [17], textura de superfície é definida como uma variação aleatória ou regular de intensidades ou a geometria de um padrão bidimensional.

Como abordado em [12], a tarefa de análise de texturas é ainda um dos maiores desafios a nível do processamento de imagem. O projecto de um sistema de visão industrial capaz de realizar uma dada inspeção de textura, exige uma grande quantidade de configurações específicas para essa textura e ainda assim, nem sempre realiza tudo o que se pretende. O que se encontra no confronto desta solução, é a visão humana que tem a capacidade natural de identificar e isolar diversos padrões sem dificuldade, mesmo por vezes, sem saber realmente o que nos leva a distingui-los. Mas isto é a grande motivação dos estudos nesta área: se nós, humanos, o conseguimos fazer sem dificuldade, também as máquinas o podem fazer desde que consigam obter de uma dada textura as características certas à sua distinção.

3.3.2 Textura e o Sistema Visual Humano

O estudo da nossa visão, e da forma como interpretamos as texturas tornou-se portanto, um campo de aprofundados estudos. Mihran Tuceryan e Anil K. Jain [15] chamam-lhe “Psico-Física”. Como conceptualização do tema é dado o exemplo das camuflagens naturais, o sucesso destes efeitos é precisamente enganar a nossa visão fazendo com que o nosso cérebro veja apenas um fundo. A separação de uma figura de um fundo é conseguida pela análise de diversos parâmetros como a cor, a textura ou a forma. Estas são as únicas armas que possuímos para evitar que sejamos “enganados”, mas a descrição mantém-se vaga. Com esta ideia, a pergunta central que naturalmente surge é simples: O que é que realmente vemos nos padrões que nos levam a distingui-los entre eles e do fundo em que se inserem?

A resposta surge através do mesmo autor, em [15], com base nas teorias e estudos de diversos investigadores como exposto a seguir.

Julesz surge como pioneiro ao apresentar os primeiros estudos e explicações na década de 60/70. Mantendo os mesmos níveis de luminosidade, contraste e cor em texturas diferentes, Julesz focou-se na estatística espacial dos níveis de cinzento como base de distinção. Este afirmava que duas texturas seriam indistinguíveis desde que as estatísticas de segunda ordem fossem idênticas. Na década de 80, o mesmo investigador apresenta a Teoria dos *Textons*. Os *Textons* são apresentados como eventos visuais, tais como colinearidades, terminações de linhas ou cantos que nos levam a identificar e distinguir texturas. Neste enquadramento, Caelli surge de imediato como seguidor desta teoria defendendo a capacidade de percepção do nosso sistema visual em utilizar os *textons* como elementos discriminatórios de texturas. No final desta década dá-se um confronto relativo à forma como se olhava para a questão central em estudo. Beck surge neste período com resultados experimentais que concluem que a percepção de textura é feita como função da frequência espacial e não como resultado de processos de agrupamento simbólico como no caso dos *Textons*.

Paralelamente aos estudos feitos pelos investigadores referenciados, também nas décadas de 70/80, estudos em psico-fisiologia defendiam que o nosso cérebro processa as imagens recebidas por análise de frequência e orientação. Campbell, Robson e De Valois foram alguns dos investigadores que obtiveram as mesmas conclusões a respeito deste assunto.

Actualmente, a Transformada de Hermite, representa uma das melhores aproximações ao modelo do sistema visual humano. Apresentada em 1990 por Jean-Bernard Martens [18], foi recentemente reformulada como modelo de representação de imagens multi-escala para análise de orientação, [19].

3.3.3 Análise de Textura

Bern Jahne, [13] apresenta a textura como o composto de quatro fundamentos: média, variância, orientação (fase) e escala (amplitude). Como introdução a esta temática, o autor, mostra a nossa capacidade em distinguir formas de fundos através de análise de padrões. Para isso, apresenta uma mesma imagem formada por letras sobre um fundo onde mantendo a média e a variância constantes vai variando isoladamente a fase e a escala. Estes dois parâmetros assumem de facto um papel essencial no transporte de informação dos padrões. Jahne apresenta como demonstração uma interessante experiência onde mostra o papel destes dois factores numa imagem. A partir de duas imagens diferentes, determinou-se a fase e a amplitude de cada uma, e procedeu-se apenas a uma troca de fases (ver figura 3.1).

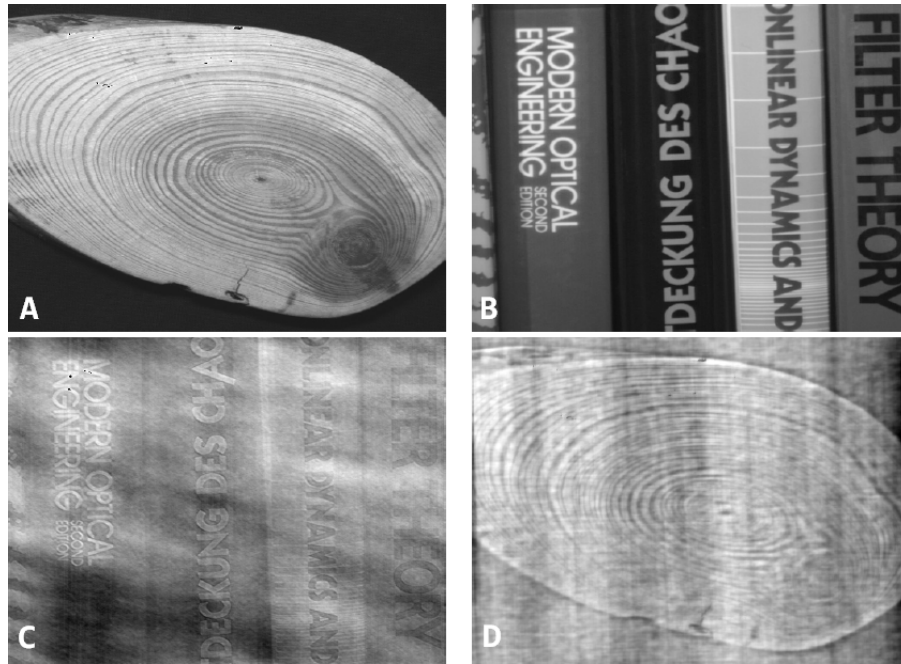


Figura 3.1 - Imagens obtidas em [13] que ilustram o significado da fase e da amplitude num padrão. A imagem D tem a amplitude de B e a fase de A, e a imagem C tem a amplitude de A e a fase de B.

Tal como refere Bernd Jahne, a nossa intuição assume à partida a amplitude como o factor mais importante de um padrão, mas isso realmente não se verifica na sua experiência. A amplitude isolada informa-nos que uma dada estrutura periódica está contida num padrão, mas não nos informa da sua disposição espacial. Esta é a informação transportada pela fase.

A Transformada de Fourier surge assim como uma importante ferramenta na análise de texturas, ao decompor uma imagem em estruturas periódicas. Uma imagem no espaço de Fourier é formada por pontos que representam componentes periódicos da imagem. A posição desses componentes periódicos é dada pela fase e pela amplitude.

Transformada de Fourier

No domínio contínuo, a Transformada de Fourier de funções com apenas uma variável é definida por:

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-j2\pi ux} dx \quad (3.1)$$

E a sua inversa por:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u)e^{j2\pi ux} du \quad (3.2)$$

No entanto, o nosso interesse nestas funções será a sua aplicação em ambientes bi-dimensionais, como as imagens. Para esses casos a função da Transformada de Fourier toma a seguinte forma:

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (3.3)$$

E a sua inversa:

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (3.4)$$

Para a análise de uma imagem de dimensões $M \times N$ no domínio das frequências, terá que ser usada Transformada de Fourier Discreta. Esta função é dada pela equação (3.5).

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad (3.5)$$

Onde u e v são as variáveis de frequência e x e y são as variáveis da imagem, ou seja, as coordenadas de um dado *pixel* com intensidade $f(x, y)$.

Para se obter a imagem original através da função $F(u, v)$, utiliza-se a função da Transformada de Fourier inversa (3.6).

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad (3.6)$$

A duas últimas equações representam o *Par da Transformada de Fourier Discreta*.

A fase (3.7), amplitude (3.8) e potência (3.9) da função de Fourier são definidas respectivamente por:

$$\phi(u, v) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(F(u, v))}{\text{Re}(F(u, v))} \right] \quad (3.7)$$

$$|F(u, v)| = \sqrt{\text{Re}(F(u, v))^2 + \text{Im}(F(u, v))^2} \quad (3.8)$$

$$P(u, v) = |F(u, v)|^2 \quad (3.9)$$

A Transformada de Fourier representa o comportamento de intensidades de uma dada imagem. A variabilidade de uma textura é apresentada numa nova representação dependente da repetitibilidade dessa textura e da sua orientação. A origem desta representação ($F(0,0)$ - equação 3.10) diz respeito à componente contínua da imagem, a média dos valores das intensidades de toda a imagem.

$$F(0,0) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \quad (3.10)$$

Geralmente a imagem a analisar é multiplicada por um factor $(-1)^{x+y}$ que provoca uma translação da origem da representação da transformada de Fourier para o ponto central da matriz de Fourier:

$$\mathcal{F}[f(x,y)(-1)^{x+y}] = F(u - M/2, v - N/2) \quad (3.11)$$

O ponto de frequências espaciais nulas $(u,v)=(0,0)$ é agora representado na posição $(M/2, N/2)$.

3.3.4 Algoritmos de Análise de Textura

Como abordado, a análise da textura pode ser feita através da aplicação directa da transformada de Fourier. Esta ferramenta permite sozinho obter um padrão de distribuição de frequências e orientações que possibilitam, através de filtros, o isolamento de elementos da imagem com determinada frequência e/ou orientação.

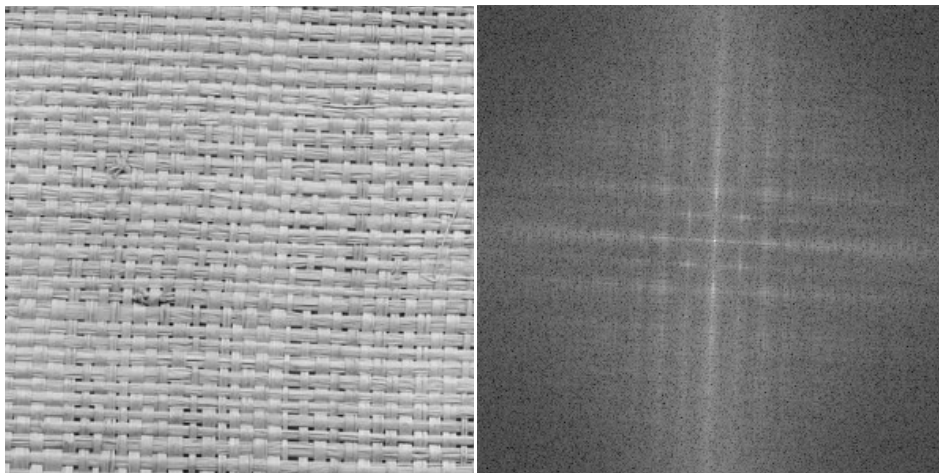


Figura 3.2 - Imagem de um tecido à esquerda e o resultado da amplitude da sua transformada de Fourier à direita.

No caso mostrado na Figura 3.2, a análise do resultado da transformada de Fourier permite identificar diversos picos de componentes de relativa baixa frequência e com orientações definidas. A análise de defeitos pode ser realizada pela comparação dos resultados de duas imagens filtradas, ou seja, numa textura com uma dada frequência e orientação mais frequente (representada por um pico no domínio das frequências), a imagem resultado da transformada inversa desse ponto pode ser utilizada como base de comparação (subtracção) a outras imagens obtidas por outros filtros de diferentes frequências de forma a destacar apenas os elementos de frequências não previstas (que podem representar um defeito).

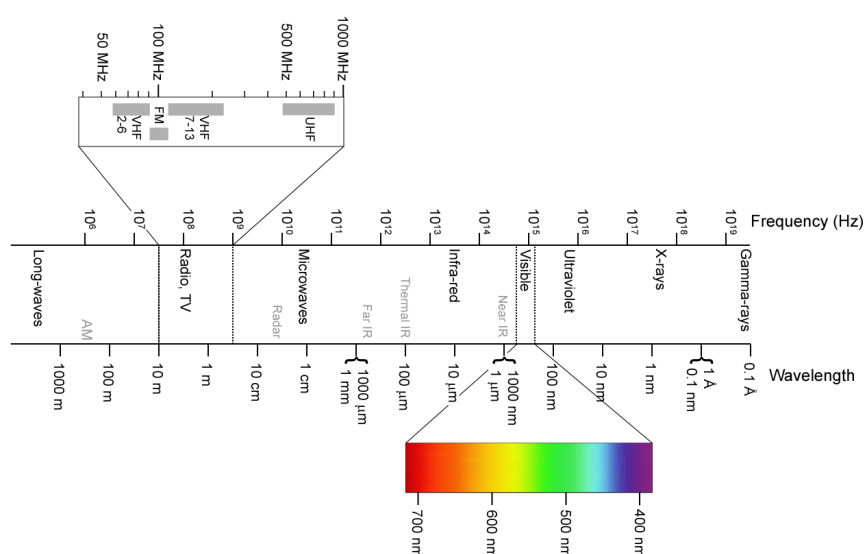
A mudança de domínio na Transformada de Fourier é vantajosa pela informação dada relativa ao comportamento global da imagem, mas existem casos em que a associação de um dado comportamento de frequências deve ser ligada à respectiva localização geométrica. Os Filtros de Gabor vão de encontro a essa necessidade, criando um domínio de frequência em função da localização espacial mas perdendo-se a informação relativa à fase existente no domínio de Fourier.

3.4 Cor

3.4.1 Teoria da Cor

De um ponto de vista biológico, a cor representa percepção visual nas células da retina provocada por um determinado feixe de fotões. Como descrito em [24], a cor é a sensação criada em resposta à excitação do nosso sistema visual devido à radiação electromagnética conhecida como luz. Esta radiação corresponde à região com comprimentos de onda entre os 400 e os 700nm (ver figura 3.3).

A cor de um dado material é determinada pela média das frequências das ondas que as suas moléculas reflectem, ou seja, um dado material tem uma dada cor se não absorver os raios correspondentes à frequência dessa cor. Como exemplo, uma bola é vermelha se absorver todas as ondas com frequência fora da gama de 480-405 THz, que corresponde à gama de frequências do vermelho.



Fonte: en.wikipedia.org

Figura 3.3 - Espectro electromagnético, com realce da gama de frequências correspondentes à zona de luz visível.

Como mostrado por Isaac Newton no ano de 1666, um prisma é suficiente para fazer a decomposição da luz branca num espectro de todas as cores visíveis - espectro da figura 3.3. A cor branca corresponde precisamente à sobreposição de todas as cores, e o oposto, o preto, representa a ausência total de luz.

Em [24] são dados os conceitos de Intensidade (*Intensity* [I]), Brilho (*Brightness* [Br]), Luminância (*Luminance* [Y]), Luminosidade (*Lightness* [L]), Matiz (*Hue* [H]) e Saturação (*Saturation* [S]) e assume-se que os humanos tem uma percepção da cor baseada na tonalidade, luminosidade e saturação (HLS). A tonalidade representa um atributo da cor, que corresponde ao comprimento de onda do máximo numa mistura de ondas de luz e por isso, este atributo representa a cor predominante na percepção de um dado observador. A saturação representa a pureza relativa ou a quantidade de luz branca misturada com a tonalidade. As cores do espectro estão à partida puras, totalmente saturadas, mas cores como o cor-de-rosa (resultado da mistura de vermelho e branco) têm um nível de saturação mais baixo. A luminosidade é um atributo da percepção visual onde uma dada área parece emitir mais ou menos luz (grau claro-escuro).

Semelhante ao sistema HSL, existe o sistema HSB ou HSV onde a luminosidade é substituída pela brilho ou valor, mas a definição da imagem é realizada de forma idêntica.

Os sistemas RGB e CMYK surgem como dois métodos também de caracterização e definição de cores, mas tem princípios básicos exactamente opostos. O sistema RGB (sigla de *Red, Green, Blue*) é um sistema aditivo de cores. Parte-se de valores nulos nas três componentes que corresponde à cor preta, e por adição de cada uma das componentes geram-se cores diferentes. Este sistema é utilizado nos monitores e televisões onde cada *pixel* tem um *byte* correspondente ao valor de cada cor. Existe uma vertente deste sistema denominada RGBA, em que o ultimo parâmetro vêm de *Alpha* e corresponde ao valor de transparência. O sistema CMYK (sigla de *Cyan, Magenta, Yellow e Black*) funciona de forma subtractiva devido à absorção da luz. As cores que são vistas advêm da parte da luz que não é absorvida. Este sistema é baseado na mistura de tintas (contrariamente com o que acontece no sistema RGB que funciona apenas por emissão de feixes de fotões), e é o mais utilizado na indústria gráfica.

3.4.2 Análise Computacional da Cor

Como já referenciado, o sistema RGB é o utilizado em monitores e televisões. Existem versões digitais do CMYK mas são resultado de uma modificação do sistema RGB e é um sistema com um espectro mais reduzido que o do sistema RGB, existindo por isso cores RGB não existentes nesse sistema.

Para a definição digital de cor, o sistema RGB utiliza 8 *bits* associados a cada cor resultando em 24*bits* por cada *pixel*. Os 256 níveis de cada cor conjugados, criam uma gama de 16 milhões de cores com diferentes tonalidades e brilhos ($256^3 = 16.777.216$).

Para o processamento das imagens, geralmente opta-se apenas por um *byte* (8 *bits*) por cada *pixel*. Dependendo da aplicação, do tipo de imagem e do tipo de característica que se pretende inspeccionar, pode-se simplesmente fazer uma decomposição da imagem numa das cores e processar apenas essa componente, ou tratar a imagem na sua escala de cinzentos.

A escala de cinzentos representa uma amostra da cor presente nesse *pixel*. O valor correspondente a cada *pixel* pode ser obtido directamente pela média aritmética das três componentes RGB ou utilizar uma média pesada optimizada em relação à percepção humana, de 30% da componente de vermelho, 59% da verde e 11% da componente azul.

A imagem binária é outra forma de representação da cor de uma imagem. Neste caso, cada *pixel* é representado por apenas um *bit*, correspondendo à possibilidade de assumir dois estados - preto para valor '0', e branco para valor '1'.

3.4.3 Algoritmos de Análise de Cor

A análise de cor numa imagem pode ser realizada por análise individual de cada *pixel* ou por análise de uma gama ajustável dos vizinhos desse *pixel*.

A análise individual de cada *pixel*, também denominada por operação pontual, permitem realizar diversas transformações nas imagens associadas a funções de transformação. O contraste e o brilho são duas das possibilidades (ver figura 3.4).

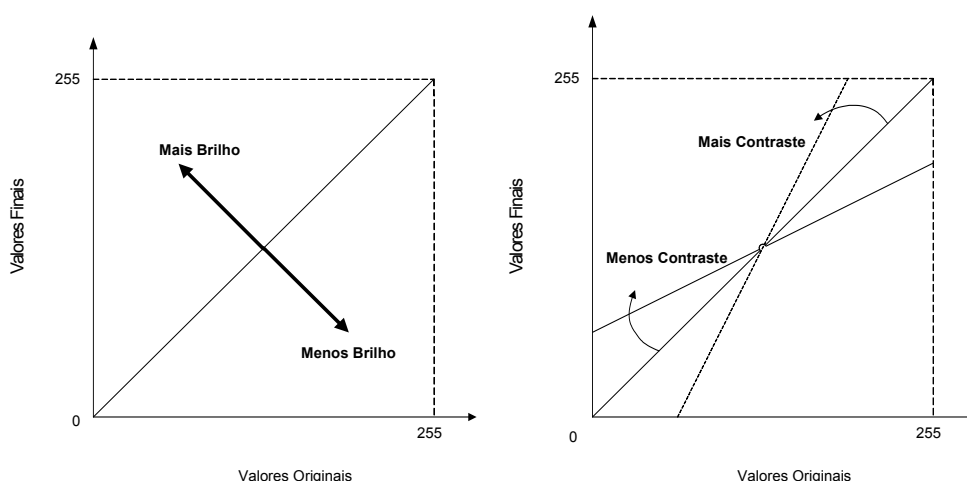


Figura 3.4 - Gráficos de transformação de imagem, à esquerda alteração de brilho e à direita alteração de contraste

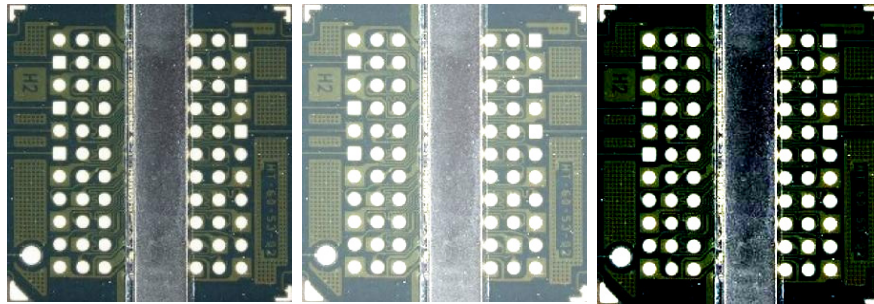


Figura 3.5 - À esquerda imagem original, no centro com mais 30% de brilho, à direita com mais 60% de contraste relativamente à original.

Por análise das imagens da Figura 3.5, verifica-se que este tipo de operações pode ser bastante útil ao fazer o realce de características antes da sua extracção, o que optimiza claramente a operação.

A inversão da cor das imagens, a equalização ou a operação de *thresholding* são outras das possibilidades de transformação por operação pontual. A inversão de cor realiza-se ao complementar o declive da recta da função. A equalização é realizada através do histograma⁴ da imagem, transformando-o numa função idealmente constante. Esta tarefa não é de todo válida para todas as imagens porque se parte de um pressuposto que a imagem teria um número infinito de valores de brilhos e um número infinito de *pixels* que permitiriam equilibrá-los da forma pretendida. Ora, com a discretização de uma imagem digital esse pressuposto torna-se impossível e a operação nestes casos, resulta geralmente numa normalização aproximada dos valores.

A operação de *thresholding* é utilizada na segmentação de uma imagem. O nível de cada *pixel* é comparado com um nível de decisão - nível de *threshold* - e o resultado dessa operação consiste numa imagem binária onde os *pixels* com valor superior ao nível de *threshold* são colocados com uma dada intensidade (geralmente o valor de máxima intensidade - branco) e os de valor inferior colocados com outro valor (geralmente valor de intensidade mínima - preto), isto no caso da operação ter apenas um nível de decisão. O nível de *threshold* é nesta operação o elemento essencial ao seu sucesso, e por isso, pode-se recorrer a diversos métodos para optimização desse valor. A análise do histograma é um deles. Quando a imagem a inspeccionar é composta por dois níveis globais de tonalidades e o objectivo é fazer a distinção fixa entre eles, o histograma dessa imagem irá assemelhar-se ao perfil de um vale. Obtendo o valor mínimo do vale, obtemos um valor correcto a aplicar ao nível de *threshold*. Este cálculo permite até criar um comportamento dinâmico nesta operação, dado que a construção e análise do histograma pode ser realizada automaticamente e isso cria autonomia a um sistema de inspecção a adaptar-se a variações globais nas tonalidades da imagem.

⁴ Função estatística representativa da ocorrência de cada nível de brilho na imagem.

Esta operação pode no entanto ser realizada a vários níveis de decisão ou de forma variável com dependência na zona da imagem. Estas são adaptações à operação principal que permitem fazer optimizações a cada caso de inspecção.

Os algoritmos de análise de cor com dependência na vizinhança de cada *pixel*, ou operações locais, podem ter variadas funcionalidades. Podem ser utilizados para fazer o realce ou suavização de zonas, reconhecimento de linhas e/ou pontos, dilatação e erosão de segmentos ou simplesmente alteração arbitrária do valor de um *pixel* através de uma função de análise de vizinhança definida pelo programador.

As suavizações são bastante utilizadas quando se pretende apagar da imagem variações bruscas de intensidade sem modificar drasticamente a imagem (por exemplo ruído). Podem ser realizados por filtros de média, média pesada (atribuindo diferentes pesos a cada vizinho) ou mediana. Estes filtros têm efeitos mais ou menos significativos dependendo do tamanho da janela que se utiliza, um filtro de média com uma janela de 9x9 resulta numa suavização claramente mais significativa do que com uma janela 3x3.

As operações de realce de linhas e pontos são realizadas por filtros de segunda ordem, onde é analisada a variação da intensidade dos *pixels* no interior de uma dada janela. Filtros de Laplace, Sobel, Prewitt, Canny ou Roberts são exemplos disso (ver figura 3.6).

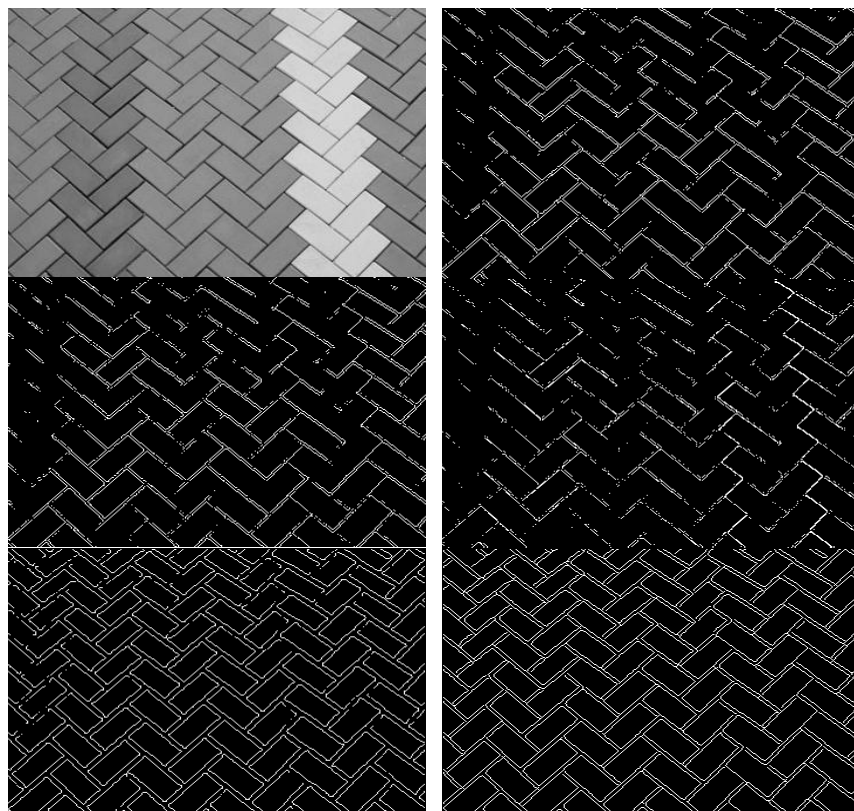


Figura 3.6 - Exemplo de aplicação de filtros de detecção de orlas: a) imagem original; b) filtro de Sobel; c) filtro de Prewitt; d) filtro de Roberts; e) filtro Laplaciano; f) filtro de Canny.

Os filtros de dilatação e erosão são também bastante utilizados e têm um funcionamento extremamente simples. Da análise dos vizinhos numa janela previamente definida, resulta o valor do *pixel* que é igual ao valor máximo encontrado caso estejamos a aplicar um filtro de dilatação ou também denominado filtro de máximo, ou igual ao valor mínimo encontrado caso estejamos a aplicar um filtro de erosão ou filtro de mínimo. Estas operações são geralmente usadas em pré-processamento ou em pós-processamento de forma a fazer o preenchimento de uma mancha com falhas ou a erosão de zonas com irregularidades nas orlas (por exemplo).

Para o isolamento de zonas e/ou linhas, os métodos de *Region Growing* (no caso de zonas) e *Raster Tracking* (no caso de linhas) realizam essas tarefas com bastante eficácia. Para ambos os casos define-se inicialmente um limite de detecção onde todos os pontos abaixo desse nível são marcados como pertencentes ao segmento a isolar. Posteriormente a esse passo define-se um limite de agregação, onde apenas os vizinhos dos pontos pertencentes ao segmento isolado serão analisados. No caso desses vizinhos possuírem valores de intensidade abaixo do valor de agregação serão incluídos no segmento isolado. Estes dois métodos são utilizados geralmente como alternativa ao *thresholding* directo, por permitirem fazer um isolamento mais rigoroso e limitado ao que se pretende.

3.5 Geometria

3.5.1 Inspeção Geométrica

A inspeção com base geométrica é muito determinada pelo tipo de objecto que se pretende analisar. Apenas superfícies com um padrão fixo e previsível podem ser inspeccionadas com este tipo de análise; geralmente apenas superfícies resultantes de processos industriais conseguem obter estes requisitos dado que as superfícies naturais não têm os níveis de previsibilidade necessários.

Há três problemas centrais que surgem ao se optar por soluções deste género. Surge a necessidade de conhecer possíveis efeitos de perspectiva que alterem a escala, a localização de referências espaciais e a orientação global da imagem.

Relativamente ao primeiro problema, este pode surgir em sistemas cuja captura não é feita com um ângulo adequado ao caso. O efeito de perspectiva altera a geometria da imagem pelo que deve nestes casos ser realizada uma compensação geométrica através de uma transformação espacial (ver figura 3.7).

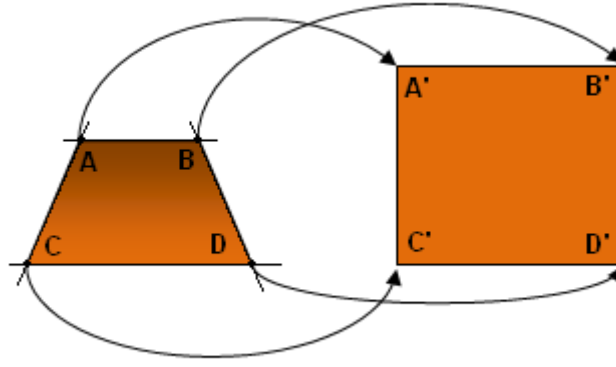


Figura 3.7 - Esquema ilustrativo de uma transformação espacial.

Em [16] são apresentadas duas equações capazes de realizar a operação pretendida alterando o ponto (x,y) para o ponto (x',y') :

$$\begin{cases} x' = c_1 \cdot x + c_2 \cdot y + c_3 \cdot x \cdot y + c_4 \\ y' = c_5 \cdot x + c_6 \cdot y + c_7 \cdot x \cdot y + c_8 \end{cases} \quad (3.12)$$

Na forma matricial a transformação toma a forma:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_5 & c_6 & c_7 & c_8 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ x \cdot y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Os coeficientes da matriz C são obtidos por experimentação, ou seja, é necessário fazer uma primeira transformação com pontos iniciais e um pontos finais de coordenadas conhecidas de forma a atribuir os valores a cada um dos coeficientes.

A aplicação desta transformação produz resultados não inteiros. Como estamos a lidar com imagens discretas de coordenadas inteiras, esta operação implica a aplicação de uma interpolação que mapeie as coordenadas (x',y') não inteiras em pontos da imagem original cujos valores estejam definidos. Alternativamente pode-se fazer o contrário, através do valor final determina-se por interpolação o valor inicial (x,y) não inteiro que aproxime a correspondência. A interpolação pode ser realizada de diferentes métodos. Um deles é com base na procura do valor de coordenadas de valores inteiros mais próxima do resultado da transformação, também chamada de Interpolação de Ordem Zero ou Interpolação do Vizinho Mais Próximo. Uma alternativa é a Interpolação Cúbica, um dos métodos computacionalmente mais exigentes e por isso utilizado apenas em aplicações mais rigorosas. Este método utiliza uma vasta gama de 16 vizinhos pesados através da função $\sin z/z$, o que resulta numa

estimativa mais suavizada do valor a atribuir a cada ponto. O método mais utilizado é a Interpolação Bilinear que analisa as distâncias entre cada um dos quatro vizinhos mais próximos e estima a partir daí e do valor de cada um dos vizinhos o valor a atribuir.

O segundo problema das inspeções com base geométrica consiste em obter referências na imagem. Estas referências são essenciais a este tipo de processamento dado que permitem conhecer computacionalmente se a imagem se encontra disposta como se pretende. Geralmente como auxílio a esta operação são traçadas rectas entre pontos encontrados na operação anterior e através da orientação dessas rectas resolve-se o terceiro problema deste tipo de inspeções: deduz-se a orientação global da imagem e procede-se se necessário a compensações de rotação também através de transformações espaciais. As equações para esta transformação são obtidas por trigonometria (3.14).

$$\begin{cases} x' = (x - x_c) \cos \theta + (y - y_c) \sin \theta + x_c \\ y' = -(x - x_c) \sin \theta + (y - y_c) \cos \theta + y_c \end{cases} \quad (3.14)$$

Existe também aqui a necessidade de proceder a interpolações por forma a minimizar a perda e distorção de informação.

3.5.2 Algoritmos de Inspeção Geométrica

A determinação e localização de referências espaciais na imagem inspeccionada recorre geralmente a algoritmos de *feature matching*.

A aplicação do algoritmo de *matching* pode ser realizada através de dois métodos distintos. O primeiro, denominado de classificador de distância mínima, é processado por comparação de uma amostragem horizontal ou vertical de uma área pré-definida com um sinal de referência. Como as amostras têm a forma de uma onda descritiva do comportamento da imagem, um determinado nível de proximidade entre os dois sinais é utilizado para decidir se a amostra obtida diz respeito ao segmento de imagem procurado. Este tipo de algoritmos tem uma gama muito restrita de aplicações dada a sua especificidade. Algoritmos de *matching* por avaliação do nível de correlação de uma amostragem de janela têm uma aplicabilidade bastante mais vasta.

Este método utiliza uma imagem padrão, geralmente de uma característica invulgar da imagem e através de um varrimento por toda a imagem é realizada uma análise de correlação entre a imagem padrão e a imagem que se pretende inspeccionar. Obtido o mapa de correlação, procurando os valores mais altos ficam conhecidas as posições das referências procuradas. Dado o peso computacional que este algoritmo pode ganhar, é usual realizarem-se outras operações de forma a simplificar o processamento deste. A passagem das imagens

para mapas binários é uma delas. A análise de correlação entre imagens binárias é significativamente mais leve a nível computacional.

Para uma dada imagem $g(i,j)$ em escala de cinzentos, onde se vai procurar uma imagem padrão $f(i,j)$ igualmente em escala de cinzentos, o mapa de correlações é construído através do coeficiente de correlação cruzada C_{fg} calculado para cada posição, limitada à área em que se sobrepõem as duas imagens, A .

$$C_{fg} = \sum \sum_A f g \leq \sqrt{\sum \sum_A f^2 \cdot \sum \sum_A g^2} \quad (3.15)$$

Como o coeficiente de correlação depende do conteúdo da imagem, tem que se fazer uma normalização que anule essa dependência (3.16).

$$\frac{C_{fg}}{\sqrt{\sum \sum_A g^2}} \quad (3.16)$$

O resultado desta operação chama-se coeficiente de correlação cruzada normalizada.

Para imagens binárias, não há necessidade de se fazer a normalização, podendo criar-se o mapa de correlação directamente através da seguinte expressão.

$$\sum \sum_A (f - f') \cdot g \quad (3.17)$$

Em que f' é o valor da imagem padrão negada.

Esta expressão pode ser facilmente interpretada como contadora de *pixels* da imagem de valor igual ao padrão onde é descontado a essa contagem os *pixels* da imagem diferentes do padrão.

A transformada de Hough é outra ferramenta que pode ser utilizada para reconhecimento e detecção de formas parametrizadas (rectas, circunferências ou elipses) em imagens. O passo chave para esta técnica é a mudança de representação de imagem, para um espaço criado por parâmetros da forma que se procura. No caso da procura de rectas, estas são representadas pela equação (3.18).

$$\rho = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta) \quad (3.18)$$

Cada recta é parametrizada por um parâmetro ρ que representa a distância dessa recta à origem da imagem e um parâmetro θ que diz respeito à orientação da recta. Cada pixel analisado - um ponto no espaço (x,y) - é representado através de uma sinusóide no espaço (ρ, θ) . Os pontos onde várias sinusóides se interceptam, ou seja, os picos da representação transformada dizem respeito a rectas na imagem com um dado par de valores (ρ, θ) que as caracterizam.

No caso das circunferências a parametrização é feita através da equação (3.20).

$$(x - p)^2 + (y - q)^2 = r^2 \quad (3.20)$$

onde p e q representam o centro da circunferência e r o seu raio. Como temos neste caso três parâmetros não conhecidos, pode-se criar uma parametrização num espaço (p, q) e através de diversas tentativas para uma gama de valores de r , vão-se descobrindo os picos e consequentemente às circunferências.

Para o caso das elipses a parametrização é feita através da equação (3.21).

$$ax^2 + 2bxy + cy^2 = 1 \quad (3.21)$$

e o processo de detecção pode ser feito à semelhança do que se faz com as circunferências, para os parâmetros a , b , c .

4 Aplicações

4.1 Inspeção de Objectos Planos por Análise de Textura - *Inspeção de Qualidade de Couro*

4.1.1 O Sector dos Curtumes em Portugal

O sector dos curtumes nacional, já com uma história começada à vários séculos, tem vivido recentemente uma evolução significativa através de um posicionamento diversificado nos sectores com produtos de maior valor acrescentado, como o design e a moda, onde a qualidade final é determinante no sucesso desse produto.

Segundo a APIC (Associação Portuguesa dos Industriais dos Curtumes, [29]), este sector tem atingido uma posição de destaque no panorama internacional do couro - contribuindo com peso na consolidação da indústria nacional do calçado além fronteiras, um sector com grande influência na economia portuguesa - e tem como objectivos a médio prazo a sua dinamização e afirmação em nichos de mercado com capacidade de valorização de produto onde o factor preço é secundarizando relativamente ao factor qualidade.



Fonte: www.apic.pt

Figura 4.1 - Marca identificativa dos couros de qualidade produzidos em Portugal.

O sucesso dessa consolidação está totalmente dependente dos níveis de qualidade nas produções, e isto tem sido conseguido por uma qualificação dos recursos humanos, melhoramento na gestão das empresas e por uma adequação tecnológica significativa. Esta

indústria assumiu o compromisso de empreender os esforços necessários para promover a protecção do meio ambiente sem nunca pôr em causa os elevados níveis de qualidade exigidos, e isso tem sido possível pela criação nas empresas de uma forte inovação tecnológica.

4.1.2 A Inspeção de Couro

A qualidade do couro está muito dependente da criação que é dada aos animais dos quais é extraído. Grande parte dos defeitos presentes na pele tem origem ainda no tempo de vida do animal e não no momento da extracção e produção do couro.

As origens dos defeitos podem ser os parasitas (como o berne e as carraças) responsáveis por criar pequenas imperfeições na pele do animal, os humanos pelas marcações de fogo para identificação do animal, pela utilização de chicotes e arame farpado (rasgos na pele levam ao aparecimento de cicatrizes) ou pelos cortes acidentais na pele durante a extracção ou as veias e artérias que por problemas de estrutura dilatam e ficam junto da pele criando deformações visíveis após a sua extracção.

Ao observar uma porção de couro, percebe-se de imediato a dificuldade da inspecção de uma superfície deste género. O seu comportamento quase uniforme dificulta a capacidade da visão humana conseguir visualizar toda a área a inspecionar sem ficar viciada ou sem ficar cansada.

Este tipo de superfície não representa um desafio apenas para humanos, a alternativa computacional encontra diversas barreiras no projecto de inspecção. A captura representa o primeiro: com defeitos de relevo e com dimensões reduzidas é essencial criar uma iluminação adaptada ao caso que torne visível o comportamento da textura da pele. Como mostrado em [30], a iluminação tangencial representa em alguns casos a melhor opção de iluminação.

A posterior identificação dos defeitos pode ser levada por diversos caminhos, mas geralmente as inspecções em superfícies desta categoria conseguem melhores resultados por análises de frequência da superfície do couro.

4.1.3 Algoritmo de Inspeção

A inspecção da textura do couro passa por procurar zonas da superfície que apresentem irregularidades ou comportamentos não uniformes. Quando se procura um desvio à regularidade, a análise de frequência constitui o método mais objectivo para o conseguir.

Para testar este tipo de algoritmo, capturou-se em laboratório uma imagem de uma superfície de couro que apresentasse zonas defeituosas, e levou-se a cabo experiências com a seguinte metodologia:

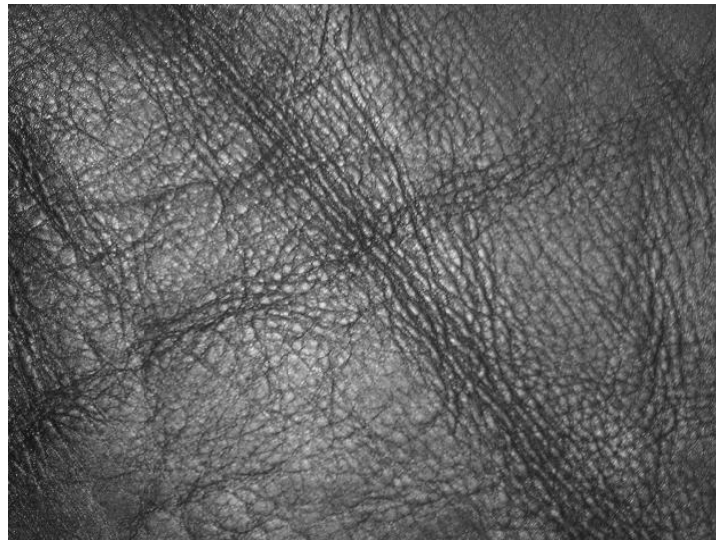


Figura 4.2 - Fotografia de uma área de couro a inspeccionar.

O primeiro procedimento realizado sobre a imagem capturada (ver figura 4.2) foi a aplicação da Transformada de Fourier, permitindo criar uma representação das frequências e orientações das texturas de toda a imagem (ver figura 4.3).



Figura 4.3 - Resultado da amplitude da Transformada de Fourier aplicado à imagem de couro preto capturada.

A partir desta representação, podemos aplicar diferentes filtros de forma a isolar as componentes da imagem procuradas. Nesta aplicação foram postos em confronto dois tipos de filtragem: filtragem por frequência e filtragem por orientação.

A filtragem por frequência é realizada através de filtros passa-banda aplicados à transformada de Fourier. Para isso são criados anéis em torno do centro da transformada que anulam a gama de frequências pretendidas (ver figura 4.4).

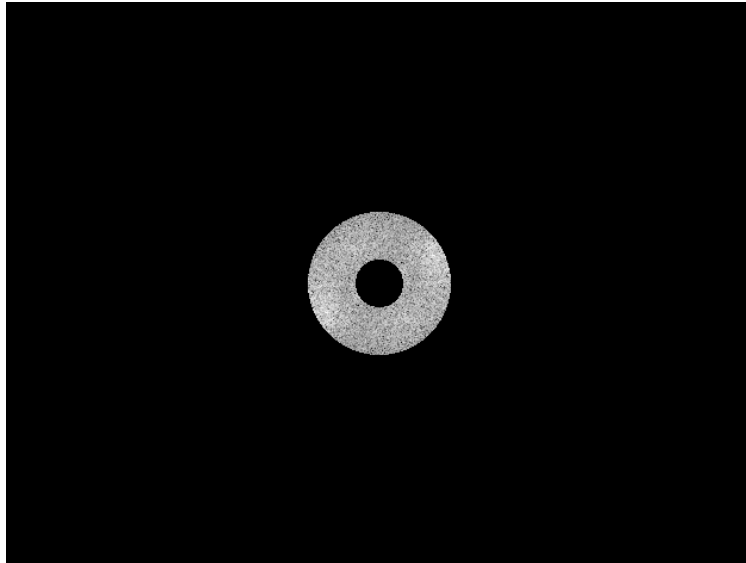


Figura 4.4 - Imagem do filtro de frequências aplicado ao resultado da Transformada de Fourier.

```
FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

    raio=SQRT((y-N/2)^2+(x-M/2)^2);

    IF (raio<raio_min) OR (raio>raio_max) THEN
      TRANSF(x,y)=0;  //são anuladas componentes fora do anel
    END
  END
END
```

A realização da transformada inversa da filtragem dá origem a uma imagem apenas com as frequências preservadas.

A aplicação de filtros de orientação limita secções a partir do centro da transformada com simetria neste ponto (ver figura 4.5), tal como mostra o código seguinte:

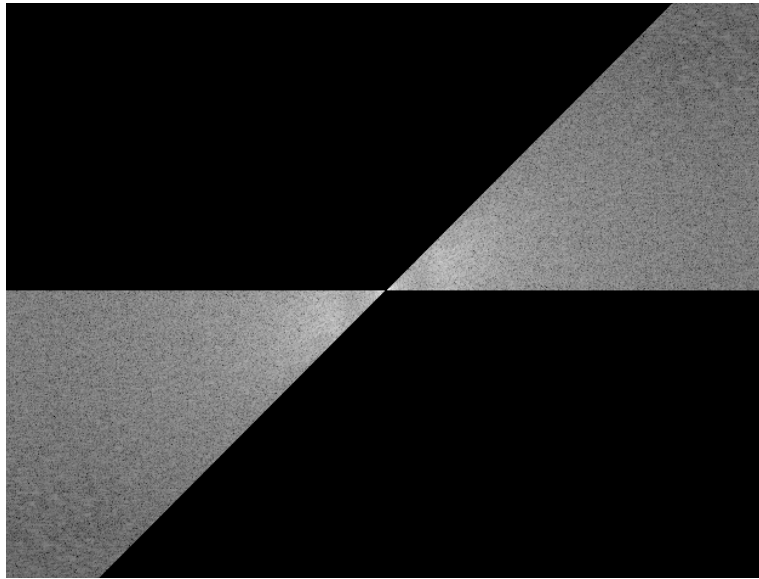


Figura 4.5 - Aplicação de filtro de orientação (entre 0 e 45°) à Tranformada de Fourier.

```

FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

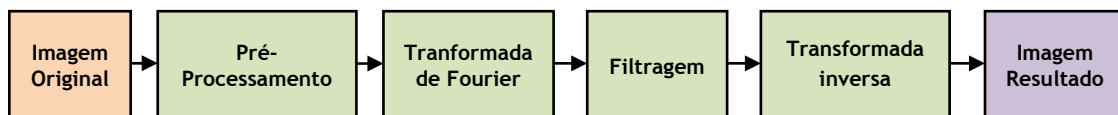
    angulo=ATAN((y-N/2)/(x-M/2))*(180/pi);

    IF (angulo<angulo_min) OR (angulo>angulo_max) THEN
      TRANSF(x,y)=0;  //são anuladas componentes fora do sector
    END
  END
END

```

Tal como acontecia com o filtro de frequência a imagem com as componentes filtradas é obtida através da aplicação da transformada inversa.

Para optimização de resultados, foram também realizados testes com pré-processamento da imagem antes de se aplicar a transformada de Fourier.



Este passo de tratamento da imagem antes de fazer a análise de frequência visa realçar as componentes que se pretende isolar, e eliminar à partida potenciais fontes de ruído. Para essa tarefa escolheram-se filtros de gradiente pela sua capacidade de realçar variações na imagem e absorver zonas de fraca variação (ver figuras 4.6 e 4.7). As áreas de couro de boa

qualidade têm exactamente essas características, uma textura com mudanças de intensidade muito suaves, ao contrário dos defeitos que apresentam variações consideráveis de intensidade.

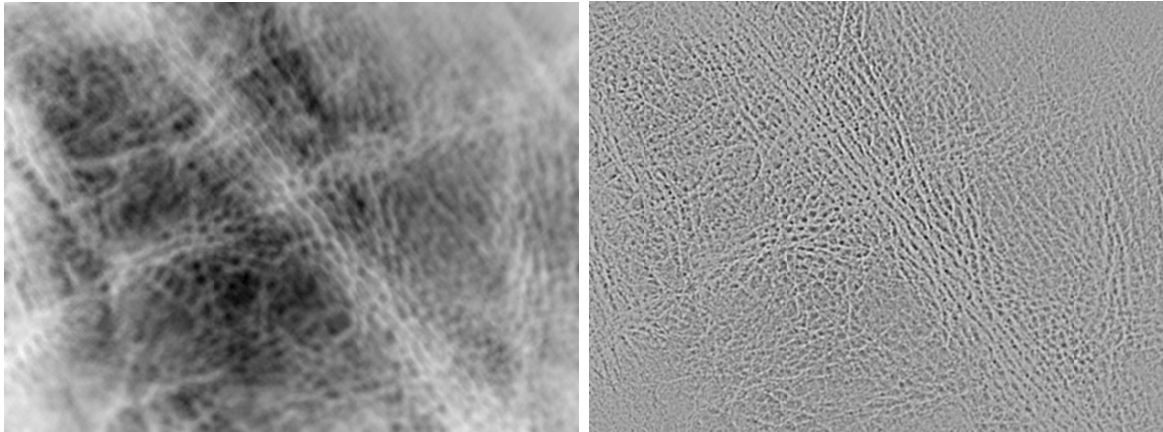


Figura 4.6 - Resultado de pré-processamento utilizando o Laplaciano do Gaussiano com uma máscara 33x33 (à esquerda) e com máscara 9x9 (à direita).

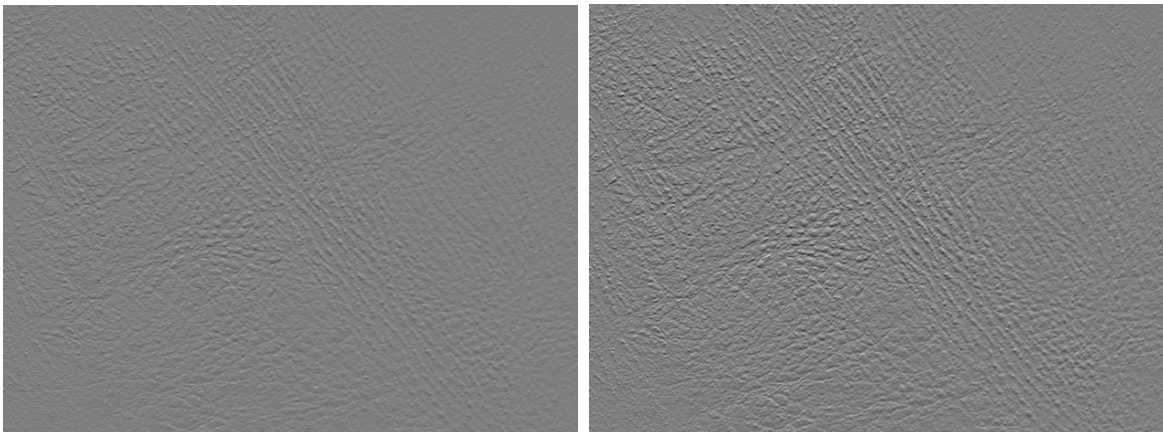


Figura 4.7 - Resultado do pré-processamento utilizando Filtro de Prewitt ou Filtro de Sobel (à esquerda) e com aumento de contraste de 10% na imagem original antes da aplicação do filtro (à direita)

É de facto notório o realce das regiões texturadas em todas as imagens. Na Figura 4.6, o tamanho da máscara é determinante: quanto maior, mais suavizada se torna a imagem (efeito do filtro Gaussiano) e isso provoca maior realce de informação. Na Figura 4.7, a diferença situa-se no contraste aplicado na imagem original antes da aplicação do filtro. Um aumento de contraste provoca um realce mais acentuado por parte do filtro.

4.1.4 Resultados

O confronto entre filtros de orientação e de frequência, mostra uma maior eficácia nos filtros de orientação. No entanto a restrição naturalmente provocada por um dado filtro de orientação leva a que seja criado um banco de filtros para que todas as situações sejam abrangidas.

As imagens seguintes mostram diversos filtros de frequência aplicados e os respectivos resultados após transformada inversa (ver figuras 4.8 a 4.13).

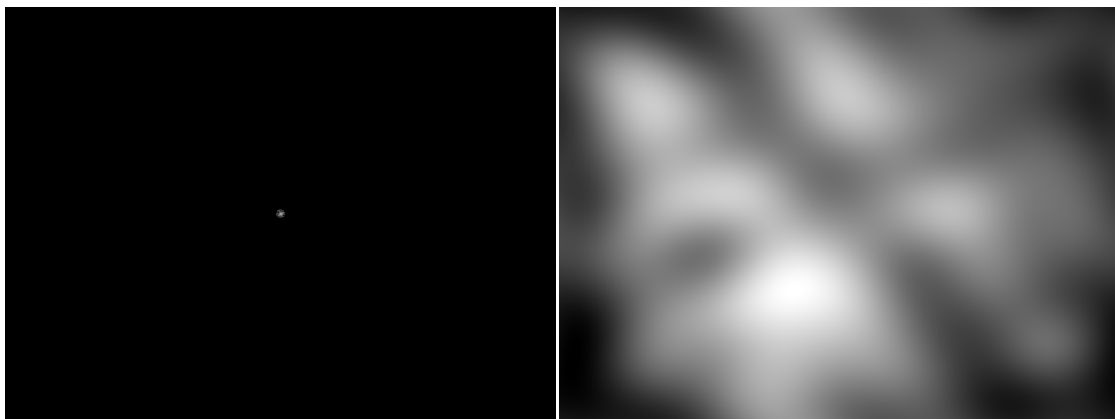


Figura 4.8 - Aplicação de filtro passa-baixo com diâmetro máximo de 5. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e tranformada inversa (à direita).

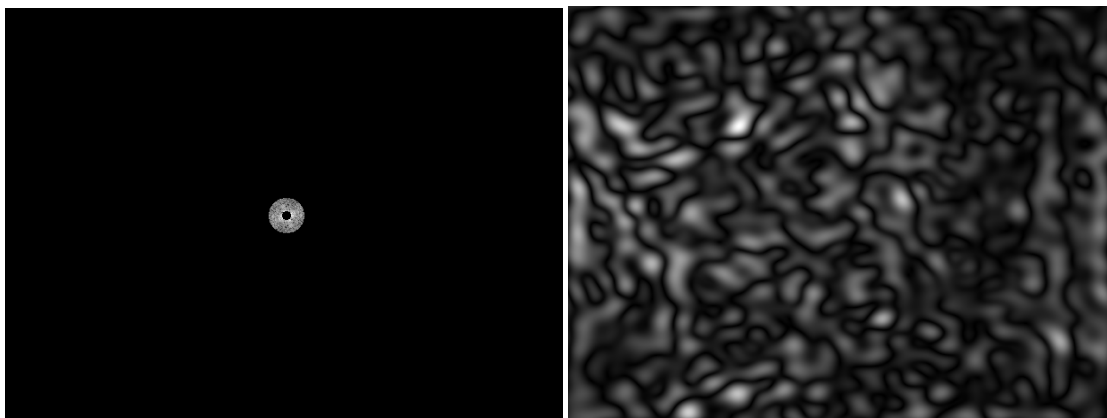


Figura 4.9 - Aplicação de filtro passa-banda com gama de diâmetros entre 0 e 20. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e tranformada inversa (à direita).

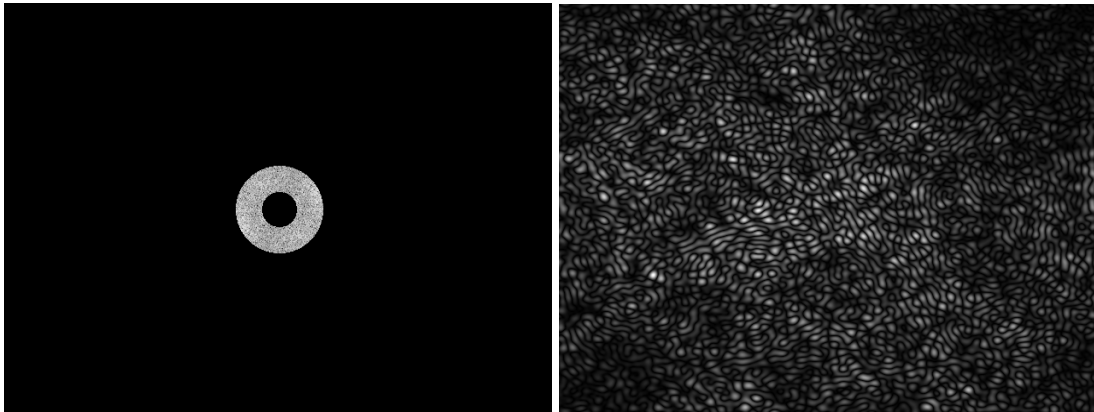


Figura 4.10 - Aplicação de filtro passa-banda com gama de diâmetros entre 20 e 50. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e tranformada inversa (à direita).

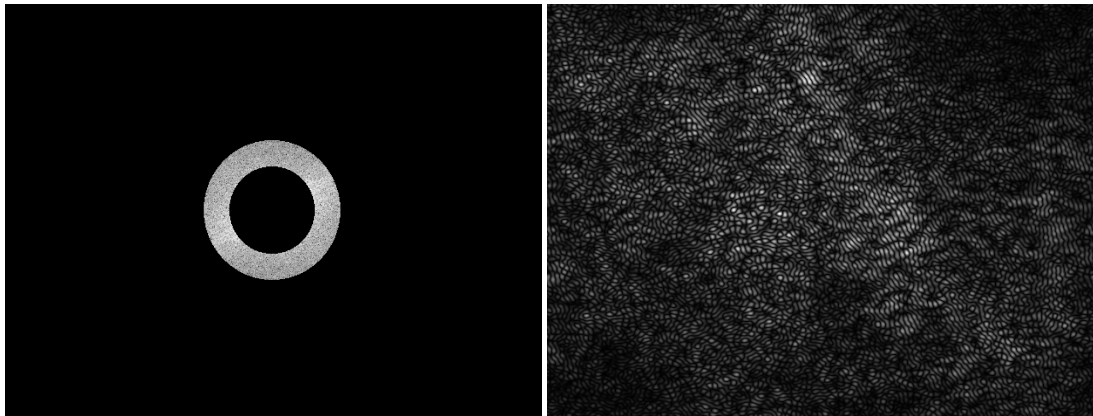


Figura 4.11 - Aplicação de filtro passa-banda com gama de diâmetros entre 50 e 80. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e tranformada inversa (à direita).

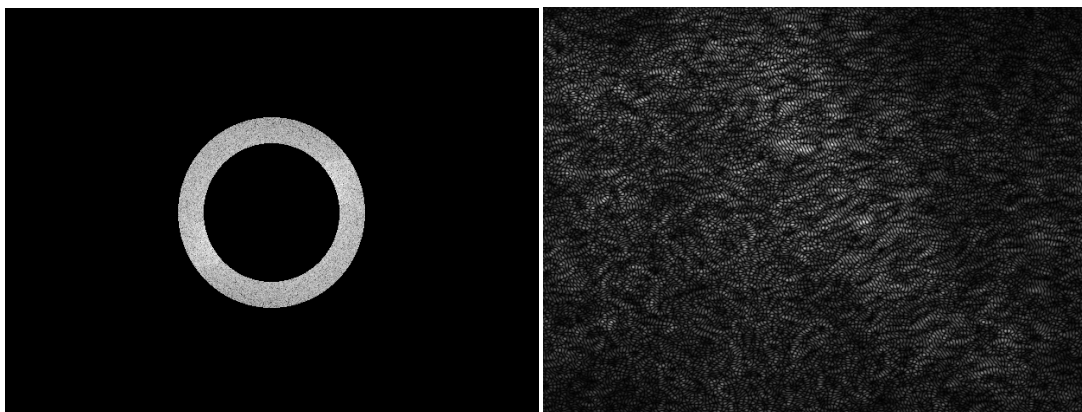


Figura 4.12 - Aplicação de filtro passa-banda com gama de diâmetros entre 80 e 110. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e tranformada inversa (à direita).

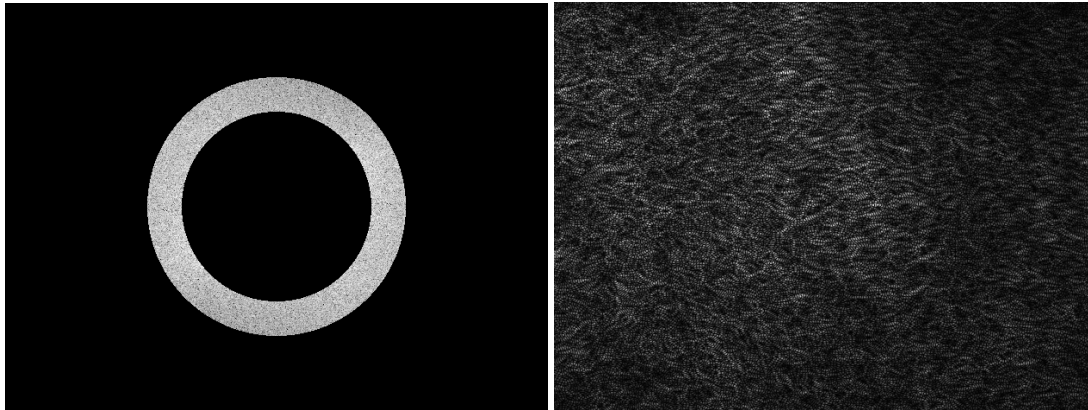


Figura 4.13 - Aplicação de filtro passa-banda com gama de diâmetros entre 110 e 150. Representação no domínio das frequências (à esquerda) e transformada inversa (à direita).

Pelas imagens mostradas, percebe-se que a análise das diversas gamas de frequência isoladas não produz resultados que permitam obter informação realmente útil ao processo. Zonas exteriores ao círculo de raio 150 foram descartadas a análise uma vez que essa zona representa um valor de energia baixo comparativamente ao ponto central, o que significa que pouca informação se consegue extrair pela filtragem dessas zonas.

A ineficácia das filtrações efectuadas transporta-nos para outro método de análise da imagem, um banco de filtros de orientação. Neste exemplo a transformada de Fourier foi seccionada em quatro gamas de orientações: 0-45°, 45°-90°, 90°-135° e 135°-180° (ver figura 4.14). Como cada uma das gamas produz, naturalmente, resultados diferentes, a análise dos efeitos dos filtros terá também que ser feita separadamente para cada gama de orientações.

A este método foi ainda adicionado um passo de realce de imagem após a transformada inversa de Fourier. De modo a realçar apenas os pontos de maior intensidade depois da reconstrução das componentes especificamente orientadas é feito um *thresholding* a cada um dos resultados criando essa separação (ver figura 4.16). Quanto mais alto se colocar este nível menos zonas serão realçadas. As imagens 4.17 e 4.18 mostram as detecções de defeito sobrepostas à imagem original.

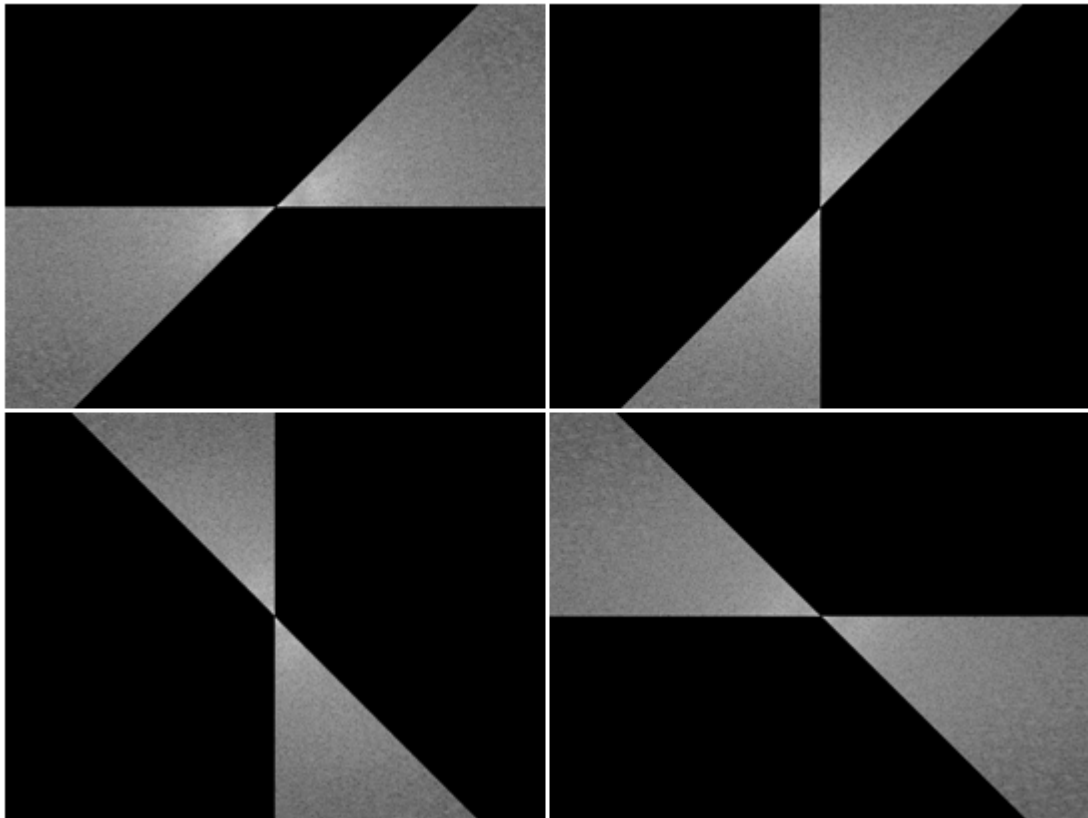


Figura 4.14 - Aplicação dos quatro filtros de orientação na transformada de Fourier.

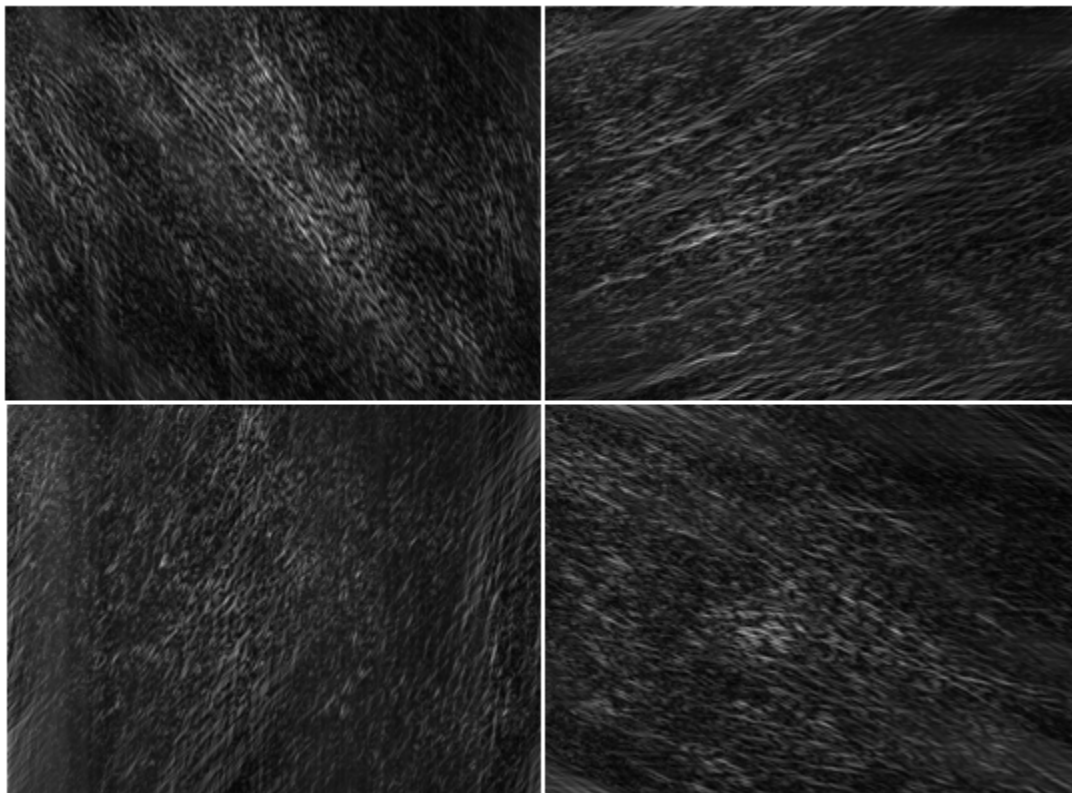


Figura 4.15 - Imagens resultado das transformadas inversas de cada um dos filtros.

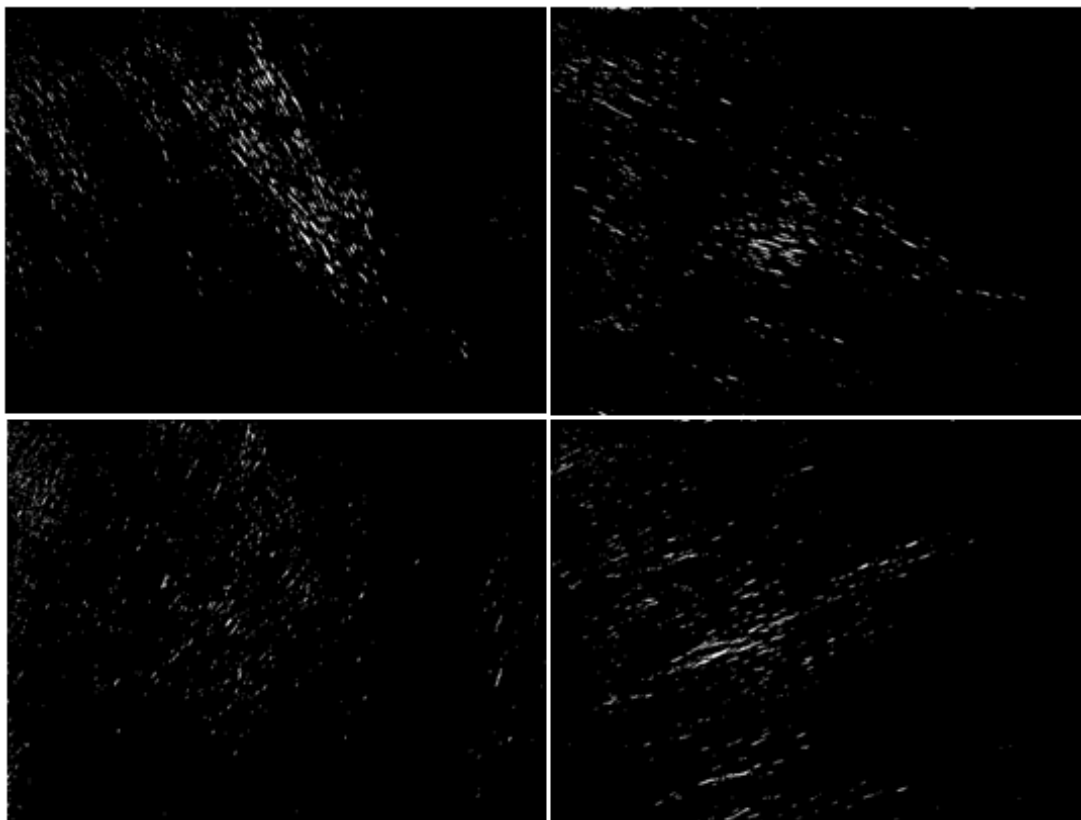


Figura 4.16 - Resultado da aplicação de um *thresholding* (nível 0,5) às imagens resultado das transformadas inversas, de forma a realçar apenas as zonas de maior relevo.

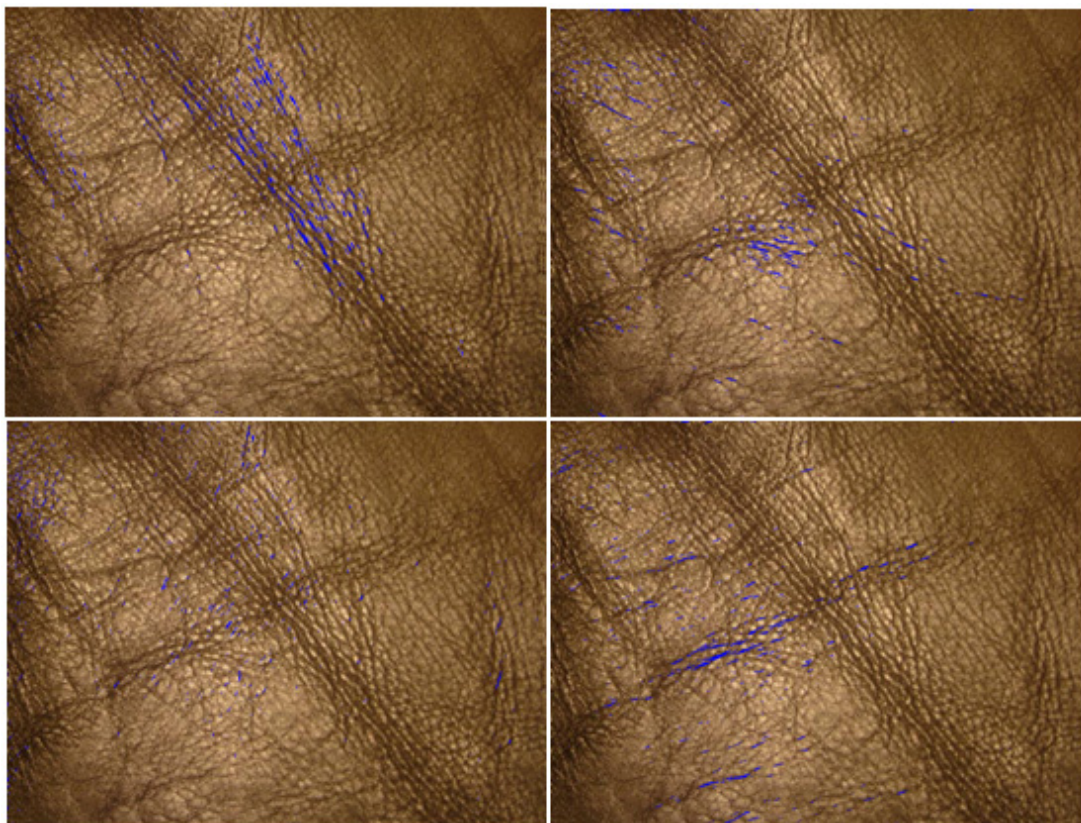


Figura 4.17 - Marcação a azul das zonas realçadas em cada um dos filtros na imagem original.

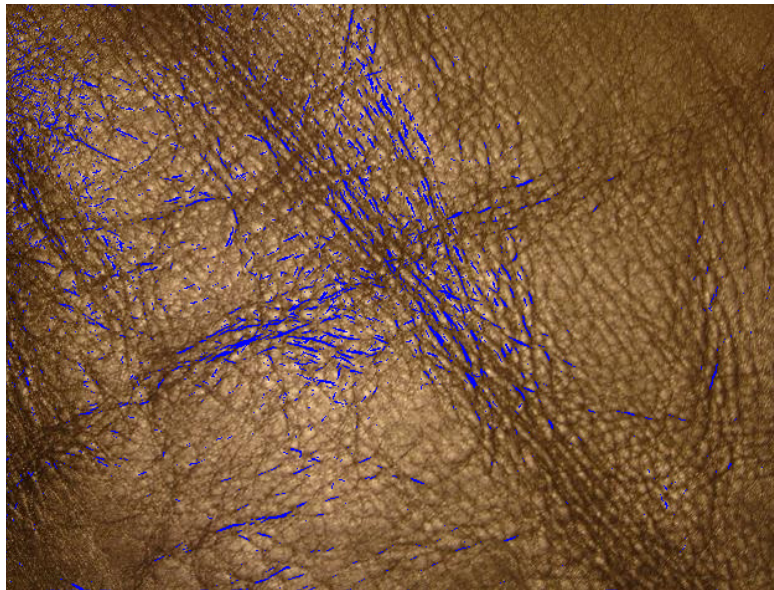


Figura 4.18 - Soma das quatro imagens como forma de ilustração de todas as zonas realçadas.

É claramente visível a diferença entre os dois métodos. Através do banco de filtros de orientação é possível obter um realce mais objectivo das zonas mais “rugosas” que se pretendem encontrar e isolar na imagem. É possível visualizar zonas não identificadas, mas é necessário levar em consideração os problemas que a iluminação induz neste caso. Como já abordado, a iluminação neste tipo de inspecções é crucial e com um sistema de iluminação perfeitamente ajustado ao caso os resultados seriam certamente mais perfeitos.

A aplicação do banco de filtros de orientação a imagens pré-processadas foi um outro alvo deste estudo. Será mostrado o resultado da aplicação dos filtros nos quatro casos de pré-processamento mostrados no ponto anterior (Laplaciano do Gaussiano com máscaras 9x9 e 33x33, Filtro de Sobel com e sem alteração de contraste), permitindo comparar o peso da realização desse passo adicional.

- **Pré-Processamento com Laplaciano do Gaussiano com máscara de 33x33 (figuras 4.19 e 4.20)**

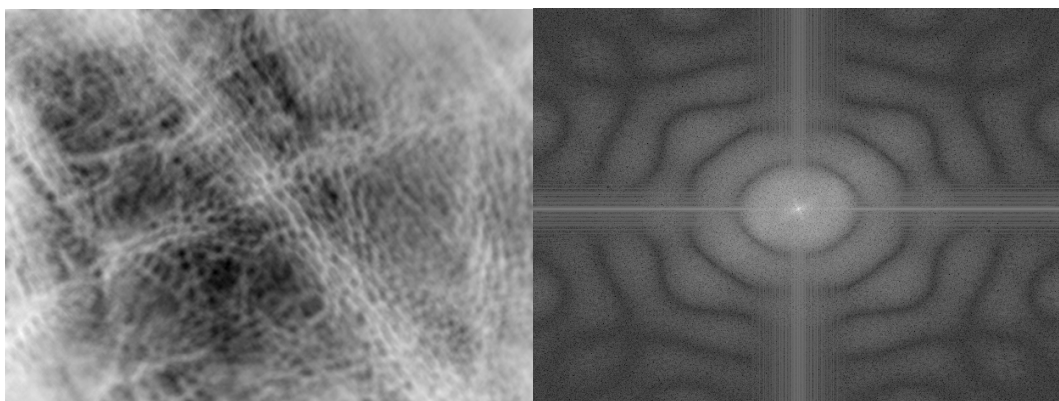


Figura 4.19 - Imagem resultado do pré-processamento (à esquerda) e resultado da transformada de Fourier (à direita).

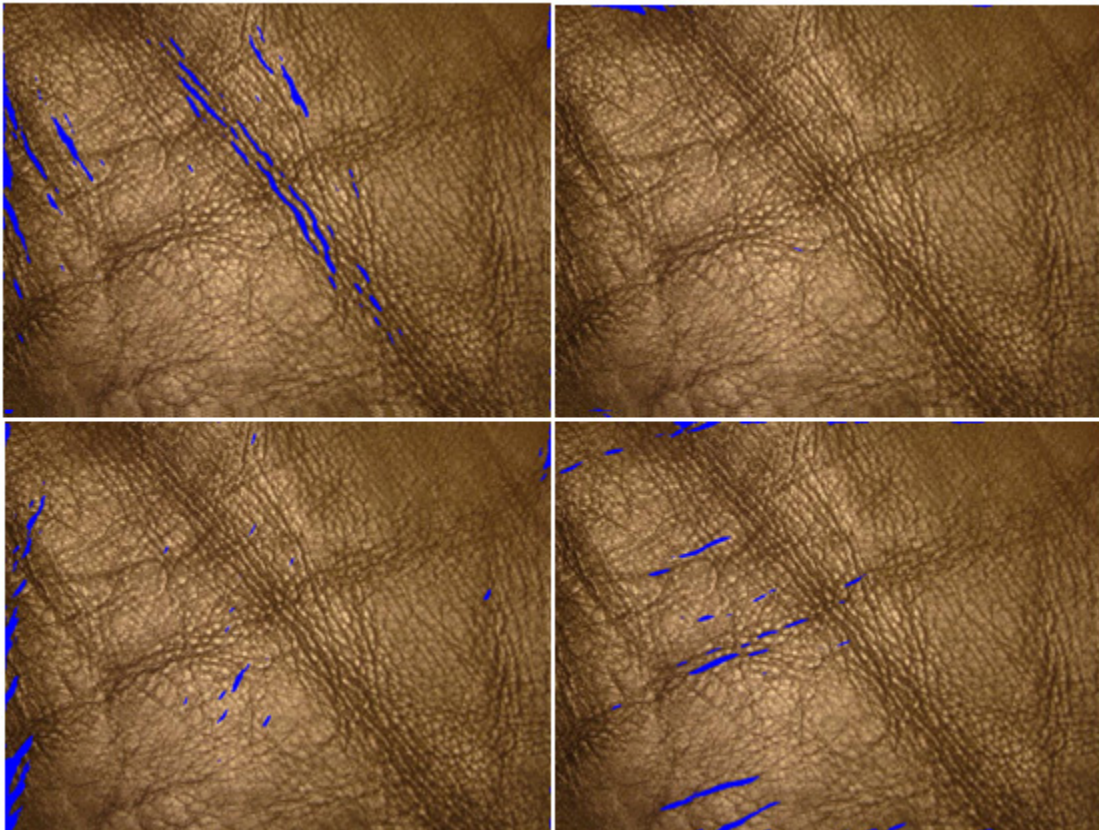


Figura 4.20 - Marcação a azul das zonas realçadas nos quatro filtros de orientação.

O processo utilizado foi exactamente o mesmo que no exemplo com a imagem original. Nota-se neste caso uma supressão de detecção de pormenores da textura. O tamanho da máscara do Gaussiano é determinante neste caso por provocar uma suavização de toda a imagem antes da aplicação do Laplaciano o que remove da imagem toda essa informação relativamente à textura da pele. No entanto grandes variações permanecem realçadas como se pode analisar pelos resultados obtidos.

- Pré-Processamento com Laplaciano da Gaussiana com máscara de 9x9 (figuras 4.21 e 4.22)

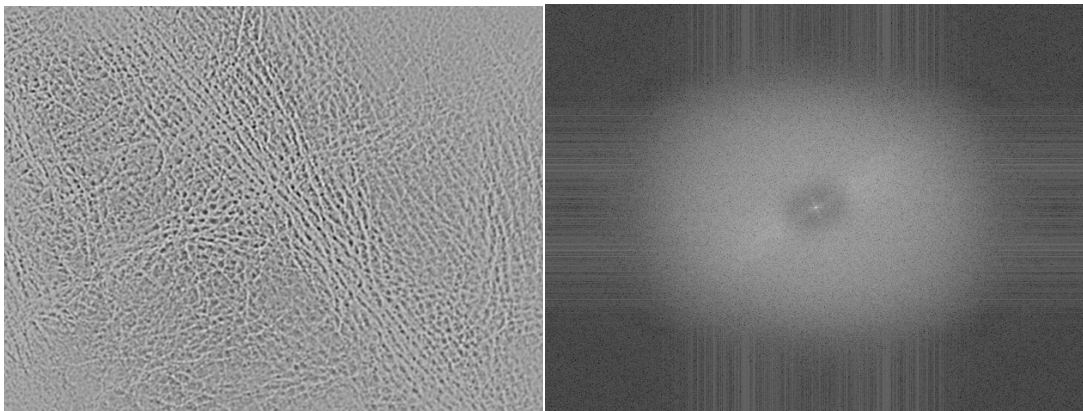


Figura 4.21 - Imagem resultado do pré-processamento (à esquerda) e resultado da transformada de Fourier (à direita).

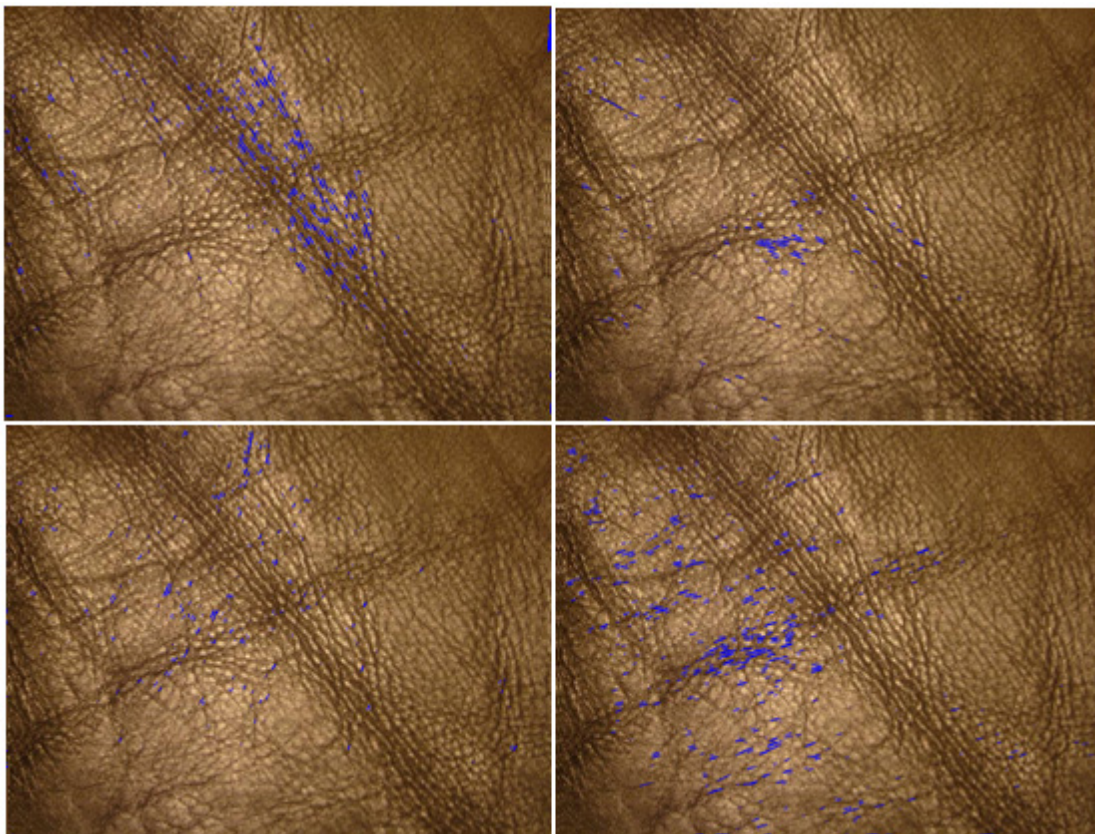


Figura 4.22 - Marcação a azul das zonas realçadas nos quatro filtros de orientação.

A aplicação do Laplaciano do Gaussiano com uma máscara 9x9, aumenta a sensibilidade a menores variações da textura relativamente ao mesmo filtro mas com a máscara 33x33.

- Pré-Processamento com Filtro de Sobel (figuras 4.23 e 4.24)

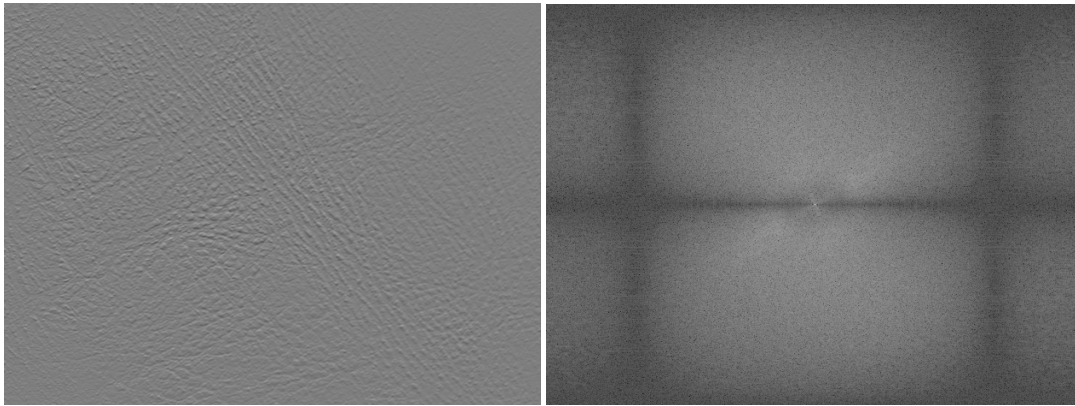


Figura 4.23 - Imagem resultado do pré-processamento (à esquerda) e resultado da transformada de Fourier (à direita).

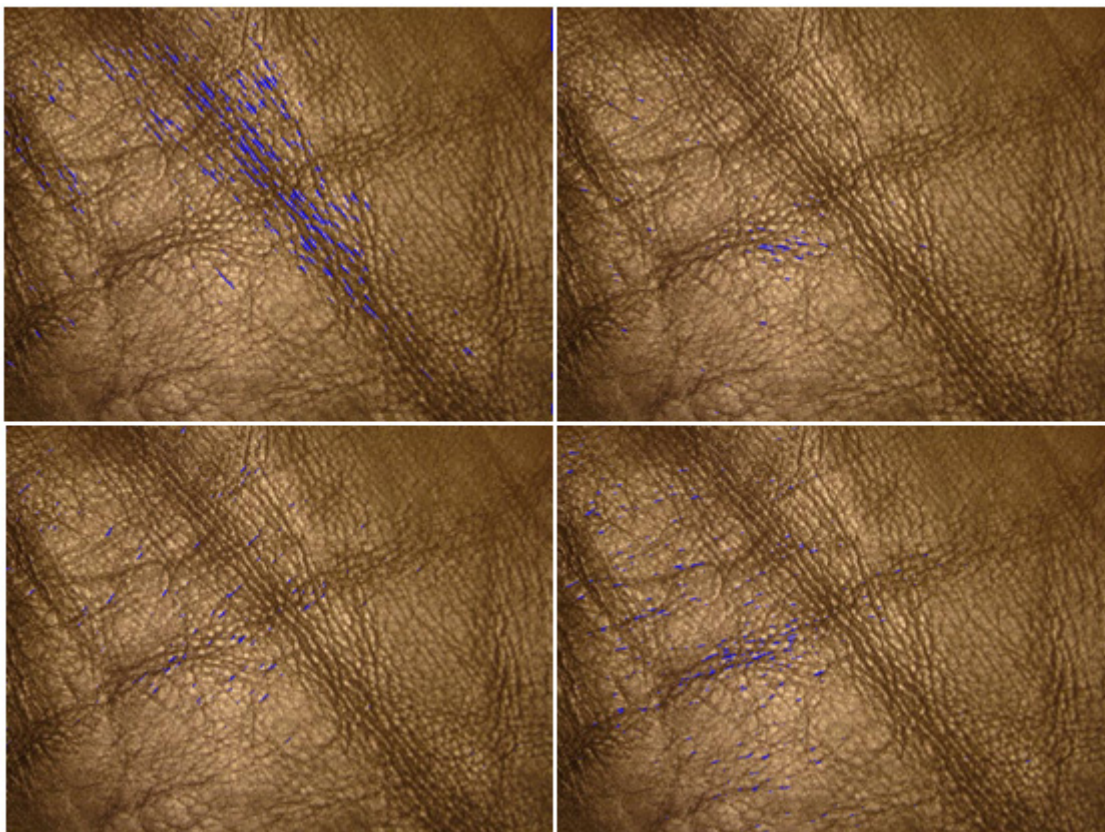


Figura 4.24 - Marcação a azul das zonas realçadas nos quatro filtros de orientação.

Neste caso, verifica-se uma grande objectividade nas zonas realçadas. Não realça todas as regiões, mas o pré-processamento dado à imagem retira-lhe alguma informação que ajuda na análise de frequência e orientação.

- Pré-Processamento com Filtro de Sobel com e sem aumento de contraste (figuras 4.25 e 4.26)

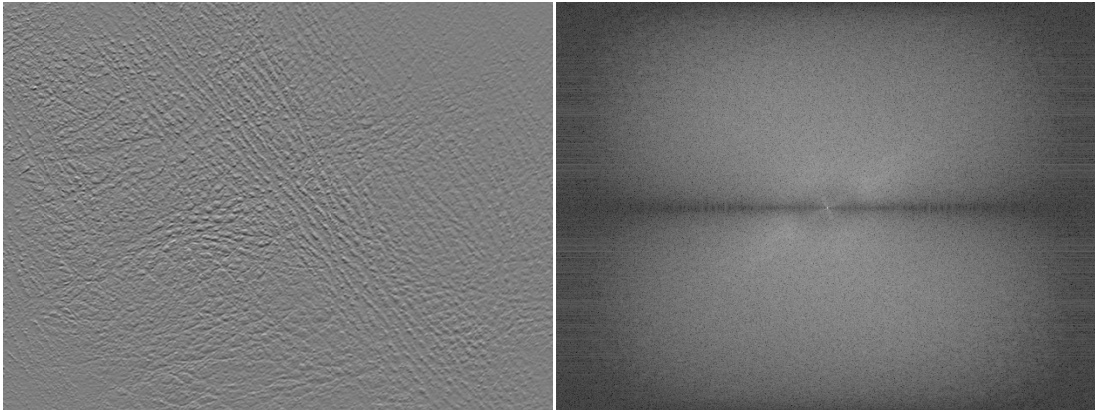


Figura 4.25 - Imagem resultado do pré-processamento (à esquerda) e resultado da transformada de Fourier (à direita).

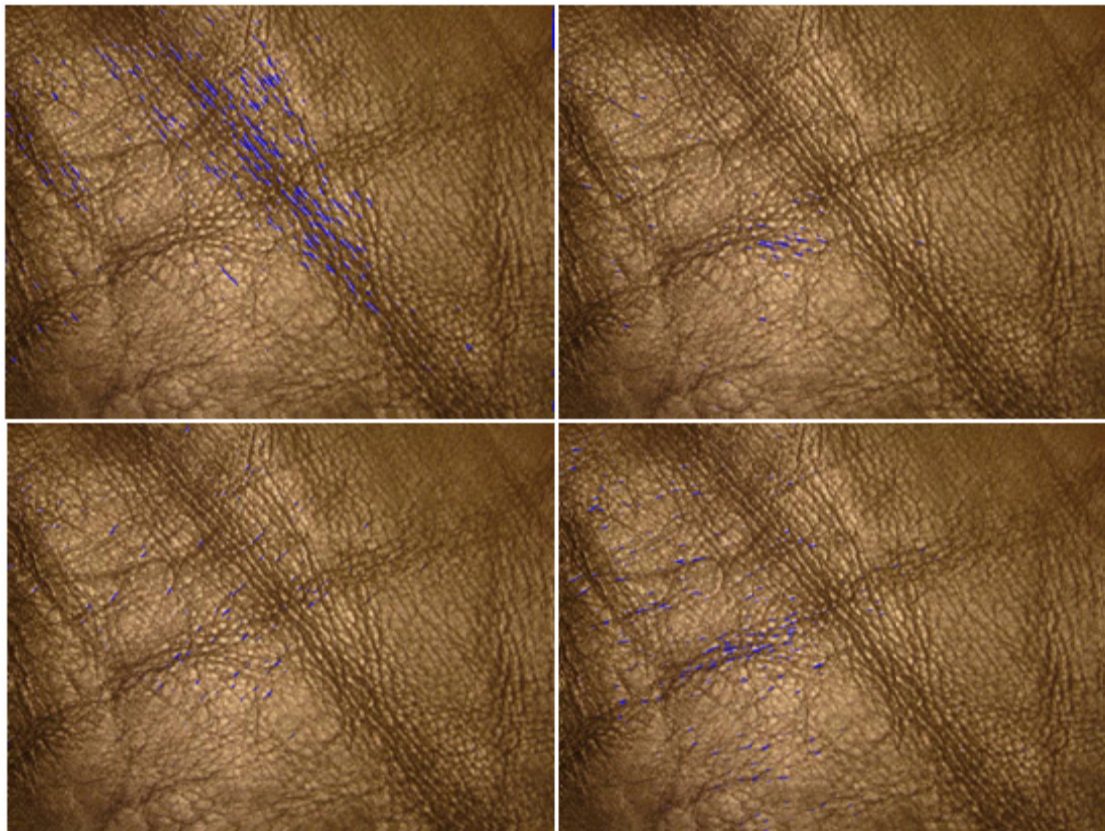


Figura 4.26 - Marcação a azul das zonas realçadas nos quatro filtros de orientação.

Não é visível agora uma diferença significativa relativamente ao resultado anterior. A variação no contraste da imagem original não levou a alterações na análise de orientação realizada posteriormente na imagem. Isto de facto é perceptível logo pela transformada de Fourier, uma vez que as principais diferenças dão-se em zonas afastadas da zona central, ou seja, zonas já de pouca energia, o que naturalmente resulta em efeitos pouco visíveis no final.

4.2 Inspeção de Objectos Planos por Análise de Cor - *Detecção de Nós em Pranchas de Madeira*

4.2.1 Indústria Madeireira em Portugal

Em Portugal, a indústria madeireira incorpora um importante sector económico no país. Representa 5,3% do VAB total da economia, 12% do PIB industrial, 12% do emprego industrial e 10% do total das exportações (dados da AIMMP de 2006, [28]).



Fonte: www.ibtmerchants.co.uk

Figura 4.27 - Fotografia de segmentos de madeira, produto de venda da indústria da serração.

O sector da serração, com maior destaque para este tipo de aplicações de inspecção, é composto por cerca de 250 empresas empregando aproximadamente 4500 operários e com um volume total de vendas de 295M€. Este sector tem ainda uma diferença grosseira entre importações e exportações, com 192M€ de exportações (com a Espanha como maior cliente - 78% do total) e 265M€ de importações (com Espanha, EUA e Brasil como principais fornecedores). O saldo tem-se mostrado constantemente negativo, mas a evolução desse valor tem sido ascendente desde 1998 até à data. Por exemplo de 2005 para 2006 houve uma subida de 14% nas exportações e uma redução de 2,5% nas importações, o que indica o crescimento da autonomia e força desse sector no nosso país.

Esta actividade económica centra-se principalmente na região norte e centro do país, representando a soma das duas 90% do total desta actividade industrial.

4.2.2 Inspeção na Indústria Madeireira

A madeira como elemento extraído da natureza, não tem em momento algum uma configuração fixa. A única informação que se possui à partida quando se inspecionam elementos de madeira, são determinadas características que se espera encontrar por haver

níveis de probabilidade de estas surgirem. Os elementos mais aleatórios dessas características são de facto os nós (ver figura 4.28).

Os nós são porções de ramos incluídos no tronco principal da árvore, e o grande problema destes elementos não é geralmente a alteração do aspecto visual das pranchas de madeira obtidas desse tronco, mas a alteração das suas propriedades físicas nesses pontos. Os nós afectam a resistência, a maneabilidade e a flexibilidade da madeira, o que provoca riscos de rachas e quebras nesses pontos. Este factor é sem dúvida essencial quando se está a fazer a escolha de madeira destinada a construções de móveis ou edifícios (por exemplo), e altera por isso o seu valor comercial.



Fonte: pt.wikipedia.org

Figura 4.28 - Fotografia de uma porção de uma prancha de madeira de pinho com nós no canto superior esquerdo.

Os anéis de crescimento e a cor da madeira são também elementos naturais com relevância no seu aspecto mas são estes de certa forma previsíveis sabendo o tipo e idade da madeira que se está a inspeccionar.

A classificação das superfícies de madeira constitui então um problema dependente da subjectividade das características acima referidas mas com rigor nas regras a aplicar. Ora, tal como referenciado em [27], essa não é uma tarefa ideal aos humanos que têm uma dificuldade natural em conseguir adoptar um critério exactamente constante em todas as inspecções realizadas. No entanto, as possíveis variações no aspecto da madeira facilmente entendidas e ajustadas por visão humana são difíceis de inspeccionar por visão artificial.

Este confronto é abordado pelo mesmo autor, [27]. Este refere que os humanos não conseguem desempenhos superiores a 70% de eficácia na classificação das madeiras. É ainda mostrado o resultado de um estudo levado a cabo por Grönlund em 1995 onde se verificou que dois inspectores diferentes a inspeccionar as mesmas pranchas de madeira, apenas em 60% dos casos atribuíram a mesma classificação. Estes valores diferem dos resultados obtidos com inspecção artificial, onde estudos de Lampinen em 1994 e de Kauppinen em 1999 lhes atribuem 80% de eficácia na inspecção e classificação dos nós em superfícies de madeira.

4.2.3 Algoritmo de Inspeção

Nesta aplicação a proposta centrava-se no desenvolvimento de um algoritmo de inspecção de pranchas de madeira por análise de cor. O resultado da inspecção visava detectar, realçar e distinguir os nós da madeira e fazer ainda o realce de zonas manchadas na zona dos nós.

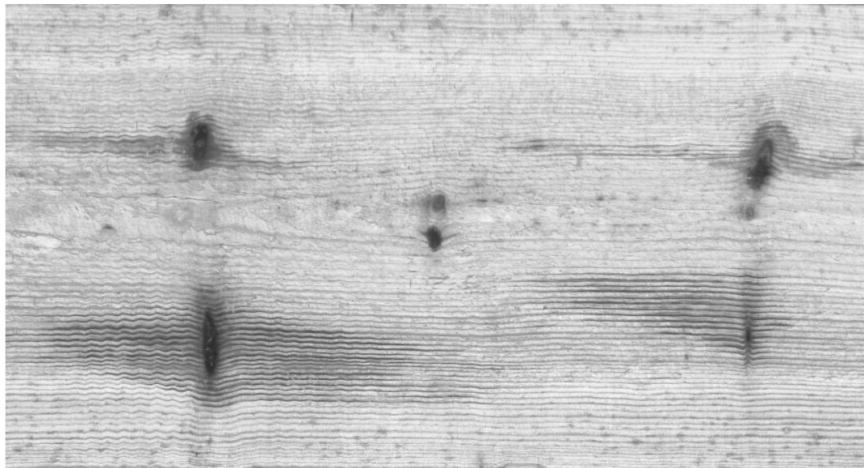


Figura 4.29 - Imagem capturada de um segmento de uma prancha de madeira, utilizada nos testes de inspecção.

O método mais directo para inspeccionar uma superfície como a apresentada na figura 4.29, seria a aplicação de uma operação de *thresholding* de forma a separar directamente “zonas escuras” de “fundo claro”, segundo o código:

```
FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

    IF Imagem(x,y)>nível_threshold THEN
      Imagem_Resultado(x,y)=1;
    ELSE
      Imagem_Resultado(x,y)=0;
    END
  END
END
END
```

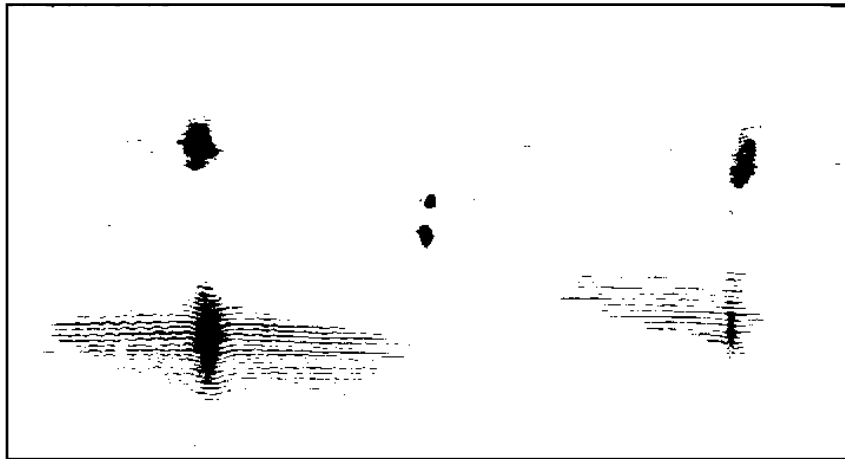


Figura 4.30 - Imagem resultado de um *thresholding* aplicado à fotografia da prancha de madeira com um nível de *threshold* de 115.

Um resultado deste género (ver figura 4.30) é no entanto portador de pouca informação. Não permite a distinção do que representa realmente nó e o que representa zona manchada pelo corte na zona do nó e com isto fica limitada a recolha de informação sobre as características presentes. A alternativa escolhida para este ponto foi utilizar um algoritmo de *Region Growing*. Primeiro procedeu-se ao isolamento dos pontos mais escuros (intensidade inferior a 70) que correspondem, com muito alta probabilidade, aos centros dos nós. Esse passo corresponde a um *thresholding* com nível de decisão de 70 (ver figura 4.31).

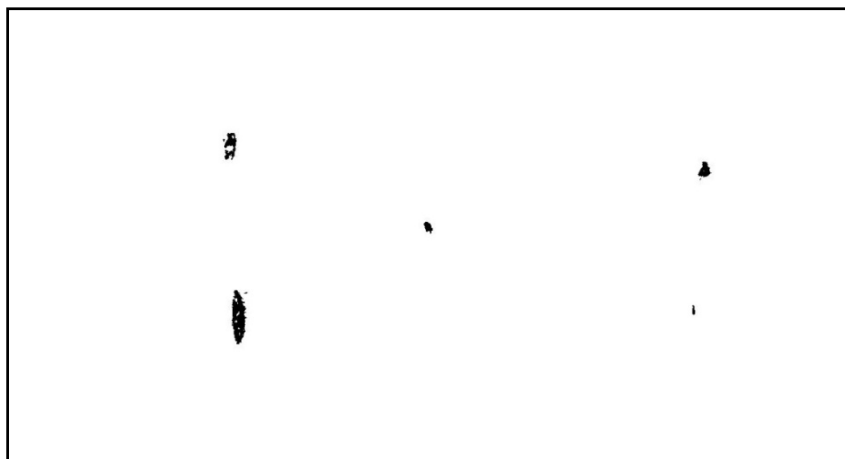


Figura 4.31 - Imagem das sementes dos nós (intensidade <70).

Os varrimentos seguintes agrupam às sementes antes detectadas, zonas vizinhas com intensidade inferior a 100, como mostrado pelo código:

```
FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

    IF Imagem_Sementes(x,y)==0 THEN
```

```

    Imagem_Resultado(x,y)=0;
    IF Imagem_original(x-1,y+1)<100 THEN Imagem_Resultado(x-1,y+1)=0;
    IF Imagem_original(x,y+1)<100 THEN Imagem_Resultado(x,y+1)=0;
    IF Imagem_original(x+1,y+1)<100 THEN Imagem_Resultado(x+1,y+1)=0;

    ELSE Imagem_Resultado(x,y)=1;
  END
END

FOR y = fim DOWNTO inicio DO
  FOR x = fim DOWNTO inicio DO

    IF Imagem_Sementes(x,y)==0 THEN
      Imagem_Resultado(x,y)=0;
      IF Imagem_original(x-1,y-1)<100 THEN Imagem_Resultado(x-1,y-1)=0;
      IF Imagem_original(x,y-1)<100 THEN Imagem_Resultado(x,y-1)=0;
      IF Imagem_original(x+1,y-1)<100 THEN Imagem_Resultado(x+1,y-1)=0;

    ELSE Imagem_Resultado(x,y)=1;
  END
END

```

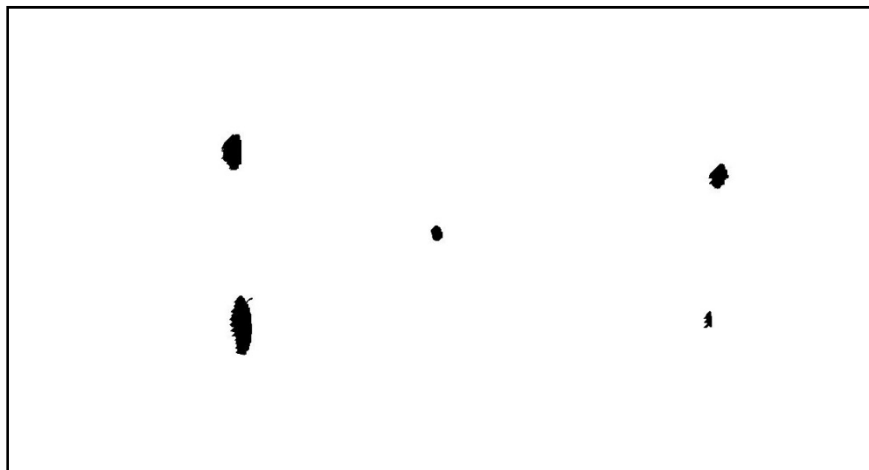


Figura 4.32 - Imagem resultado dos dois varrimentos de *Region Growing*.

A imagem resultante deste processo permitiu identificar correctamente as zonas que nas imagens equivaliam a nós. As marcas dos nós mostram consistência, mas não mostram no entanto rigor na delimitação dessas zonas. Esse factor levou a um melhoramento do algoritmo.

Na imagem anterior (figura 4.32), foram realizados seis varrimentos com marcas circulares de seis diâmetros diferentes (5, 7, 11, 15, 21, 25 *pixels*) de forma a distinguir os tamanhos das marcas dos nós. Cada varrimento é realizado da seguinte forma:

```

count=0;
FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

```

```

IF Imagem_nos(x,y)==0 THEN
  FOR r=0 TO diametro-1 DO
    FOR s=0 TO diametro-1 DO
      //conta o número de pixels do nó que são coincidentes com o círculo
      IF (Circulo(s+1,r+1)==0) AND (Imagem_nos(x-raio+s,y-raio+r)==0) THEN
        count=count+1;

      END
    END
  //se o círculo estiver todo sobreposto pinta o ponto central
  IF count==area_circulo_em_pixels THEN
    Imagem_Resultado(x,y)=nivel_de_marcação;
  END
END
END

```

O nível de marcação varia conforme o diâmetro do círculo que se está a analisar. Quanto maior o diâmetro, maiores marcas de nós vamos distinguir e por isso mais alto é o valor de intensidade a marcar. Neste caso definiu-se intensidade 70 na verificação do círculo de diâmetro 5, 100 para o círculo de diâmetro 7, 150 para o diâmetro 11, 190 para o diâmetro 15, 220 para o diâmetro 21 e 250 para as zonas que verificam o círculo de diâmetro de 25 *pixels*.

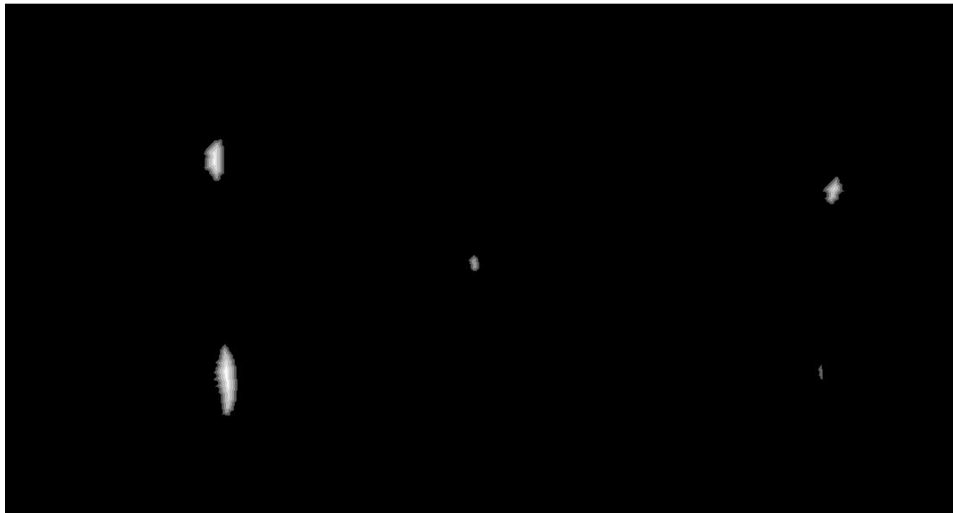


Figura 4.33 - Imagem com a sobreposição dos 6 níveis de diâmetro, resultando numa gradação da cor conforme a dimensão do nó.

O resultado do processo anterior equivale a uma imagem com uma avaliação das dimensões da marca do nó (ver figura 4.33). Esta avaliação é mais correcta do que uma contagem directa de *pixels* uma vez que permite obter uma avaliação da área real do nó e dissipar assim possíveis falsas marcações de nós com larguras reduzidas e comprimentos elevados (marcas causadas no corte por exemplo).

No passo seguinte pretendia-se o isolamento do que se considerou realmente marca identificadora de presença de nó. Neste caso mantiveram-se as marcas que se verificaram

serem maiores que o círculo de diâmetro 25, ou seja, eliminaram-se os 4 níveis mais baixos e mantiveram-se as marcas que agrupavam os 2 níveis superiores de verificação. A estas marcas foi feito novo varrimento e feito um preenchimento com o círculo de diâmetro 15 *pixels* de forma a criar delimitações das marcas mais suaves e realistas - Figura 4.34.

```
FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

    IF Imagem_niveis(x,y)>= nível_diametro_15 THEN
      FOR r=0 TO diametro_15-1 DO
        FOR s=0 TO diametro_15-1 DO

          IF (Circulo(s+1,r+1)==0) THEN Imagem_resultado(x,y)=1;

        END
      END
    END
  END
END
```

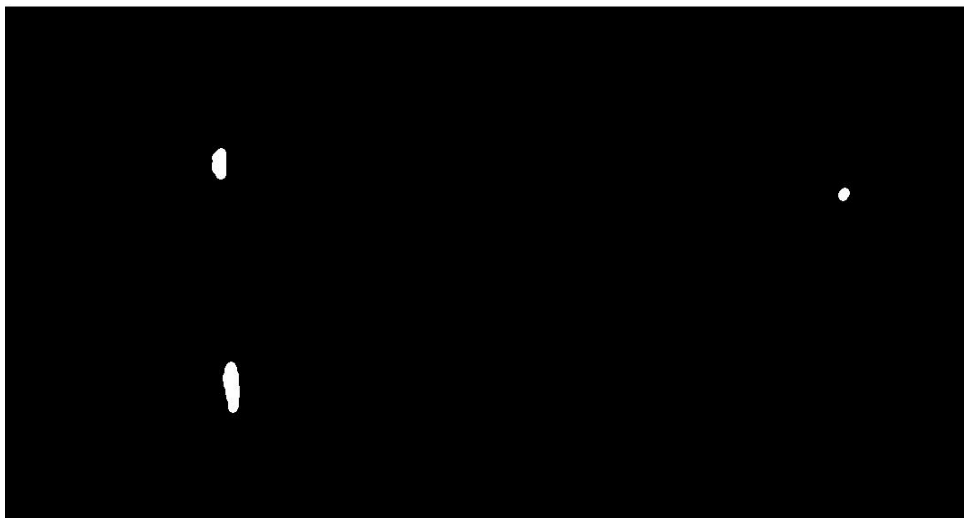


Figura 4.34 - Imagem resultado do isolamento das zonas de nós com os dois graus mais altos relativos às dimensões dos nós.

Dentro do que se considerou nó, pretendia-se fazer a contagem dos nós e realizar a separação da marcação do que se consideram nós de grandes dimensões - causam maiores desvalorizações da madeira - e nós de pequenas dimensões - menores efeitos no seu custo. Para isso, realizou-se uma etiquetagem das marcas isoladas. A atribuição inicial de etiquetas é realizada segundo o seguinte código:

```
FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

    IF Imagem_IN(x,y)==1 THEN
```

```

IF Imagem_etiq(x-1,y)>0 THEN
    Imagem_etiq(x,y)=Imagem_etiq(x-1,y);
ELSE IF Imagem_etiq(x-1,y-1)>0 THEN
    Imagem_etiq(x,y)=Imagem_etiq(x-1,y-1);
ELSE IF Imagem_etiq(x,y-1)>0 THEN
    Imagem_etiq(x,y)=Imagem_etiq(x,y-1);
ELSE IF Imagem_etiq(x+1,y-1)>0 THEN
    Imagem_etiq(x,y)=Imagem_etiq(x+1,y-1);
ELSE
    Imagem_etiq(x,y)=nova_etiqueta;
    Inc(Contagem_de_nos);
END
END
END

```

Feito isso, surge a necessidade de atribuir as equivalências das etiquetas pertencentes a um mesmo objecto para que o processo de etiquetagem se complete (ver figura 4.35). Simultaneamente é feita a contagem dos nós através da atribuição das etiquetas.



Figura 4.35 - Resultado da Etiquetagem dos nós isolados.

O processo seguinte é então determinar a dimensão de cada nó. Para isso realiza-se uma contagem de *pixels* associada a cada etiqueta.

```

FOR y = inicio TO fim DO
    FOR x = inicio TO fim DO
        IF Imagem_etiq(x,y) != 0 THEN
            SWITCH Imagem_etiq(x,y)
            CASE etiqueta1
                Inc(Contagem_etiq1);
            CASE etiqueta2
                Inc(Contagem_etiq2);
            CASE etiqueta3
                Inc(Contagem_etiq3);
            END
        END
    END
END

```

```

FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO
    IF Imagem_etiq(x,y) != 0 THEN
      SWITCH Imagem_etiq(x,y)
        CASE etiqueta1
          IF contagem_etiqueta1 > Nivel_de_decisão THEN
            Imagem_Resultado(x,y) = 200;
          ELSE Imagem_resultado(x,y) = 100;
        CASE etiqueta2
          IF contagem_etiqueta2 > Nivel_de_decisão THEN
            Imagem_Resultado(x,y) = 200;
          ELSE Imagem_resultado(x,y) = 100;
        CASE etiqueta3
          IF contagem_etiqueta3 > Nivel_de_decisão THEN
            Imagem_Resultado(x,y) = 200;
          ELSE Imagem_resultado(x,y) = 100;
      END
    END
  END
END

```

No segundo ciclo do algoritmo mostrado é realizada a verificação do tamanho dos nós. Se uma dada marca tiver mais *pixels* que um determinado valor é considerado um nó de grandes dimensões, caso contrário considera-se que é um nó pequeno. Nos testes realizados esse valor de comparação foi de 400 *pixels*. Para distinguir as marcas, representa-se na imagem final as marcas com classificação “grande” com intensidade 200 e as marcas com classificação “pequena” com intensidade 100.

Terminada a identificação e avaliação dos nós, voltou-se à imagem inicial para isolar as manchas na madeira que não pertencem ao nó, mas que provocam desvalorização das pranchas de madeira pela alteração visual. Isso foi conseguido retirando dessa imagem o que se classificou de nó (ver figura 4.36) e realizando um *thresholding* de nível 120 - o que ficou isolado pelo *threshold* foi considerado mancha



Figura 4.36 - Imagem original com recorte das zonas dos nós.

Na representação final a avaliação tem em conta três situações, o que está classificado de macha, de nó grande e de nó pequeno (ver figura 4.37).

```
FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

    IF Imagem_nos(x,y)==200 THEN Imagem_final(x,y)=vermelho;
    ELSE IF Imagem_nos(x,y)==100 THEN Imagem_final(x,y)=amarelo;
    ELSE IF Imagem_manchas(x,y)==0 THEN Imagem_final(x,y)=verde;
    ELSE Imagem_final(x,y)=Imagem_Original(x,y);

  END
END
```

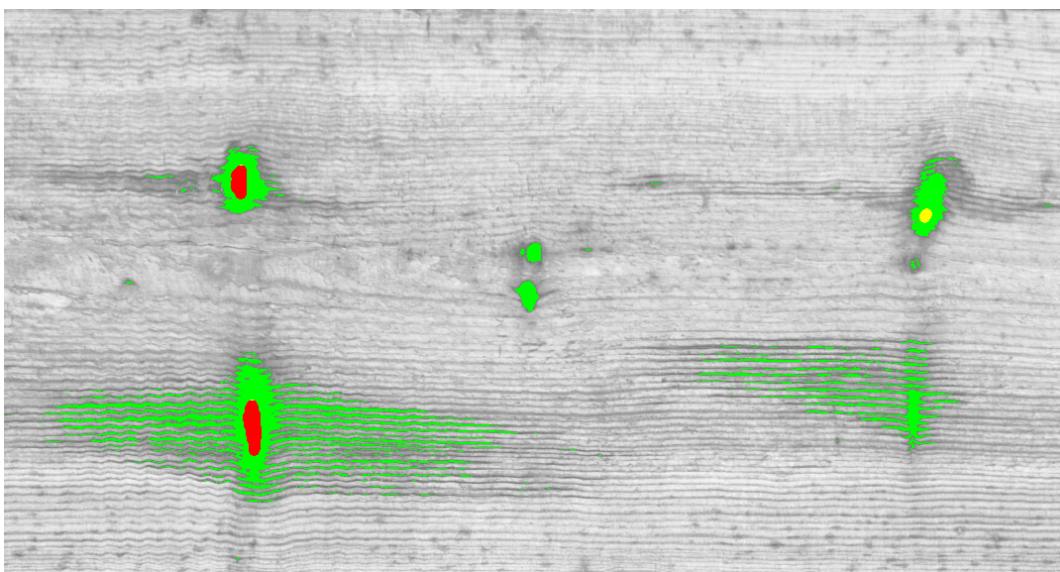


Figura 4.37 - Imagem resultado da inspeção. Realce a verde de manchas de corte, a vermelho os nós de grandes dimensões e a amarelo os nós de pequenas dimensões.

4.2.4 Resultados

A análise de cor utilizada neste tipo de inspeções remete-nos a duas possibilidades diferenciadas pelo grau de complexidade, mas também diferenciadas pelo rigor da informação resultante.

Este problema à partida poderia ser solucionado por uma simples operação de *thresholding* diferenciando zonas escuras de zonas claras. No entanto os resultados transportariam pouca informação relativamente à constituição das zonas realçadas, não seria feita distinção entre o que representa um nó pertencente à constituição da madeira e o que representam manchas criadas na superfície (durante o corte por exemplo). Em casos em que

isso não fosse um requisito, a simplicidade de processamento exigida por esta inspecção poderia ser um factor a levar em conta.

Utilizando o algoritmo descrito, a informação obtida vai de encontro a uma série de diferentes requisitos. A separação entre o que constitui um nó e o que constitui mancha, permite avançar para outros níveis de avaliação permitindo assim não só fazer a contagem dos nós, mas também atribuir classificações aos nós detectados e com isso realizar uma avaliação mais minuciosa da prancha de madeira e atribuir mais selectividade ao sistema de inspecção.

4.3 Inspeção de Objectos Planos por Análise Geométrica - Detecção de Defeitos em Substratos de Produção de Memórias SDRAM

4.3.1 Introdução

O desenvolvimento desta aplicação surgiu através de uma proposta da Qimonda Portugal, durante o segundo semestre do ano lectivo 2006/2007, integrado como trabalho da disciplina de Sistemas Baseados em Visão do plano curricular da especialização em Robótica do Major de Automação. O grupo de trabalho então formado integrava o autor e o aluno Carlos Teixeira, ambos na altura a frequentar o 4ºano do MIEEC.

O desafio consistia no desenvolvimento de um algoritmo em linguagem de prototipagem (MatLab), que conseguisse detectar em imagens de substratos obtidas em laboratório, através de câmaras fotográficas comerciais ou obtidas por *scanner*, o defeito de *incomplete mold* e a detecção dos BUMs.

Inicialmente, apenas se pretendia que o algoritmo de inspecção visual fosse capaz de fazer a detecção do defeito de *Incomplete Mold*. Com o avançar do tempo, a detecção e contagem dos BUMs (*Bad Unit Marks*) tornou-se também num requisito importante e vista a possibilidade de integração na algoritmia de processamento em desenvolvimento, foi feita uma adaptação desta nova funcionalidade de forma a processar as duas tarefas para cada substrato inspeccionado.

O defeito de *incomplete mold* consiste no preenchimento deficiente dos *bond channels* durante a operação de *Molding* (ver figura 4.38).

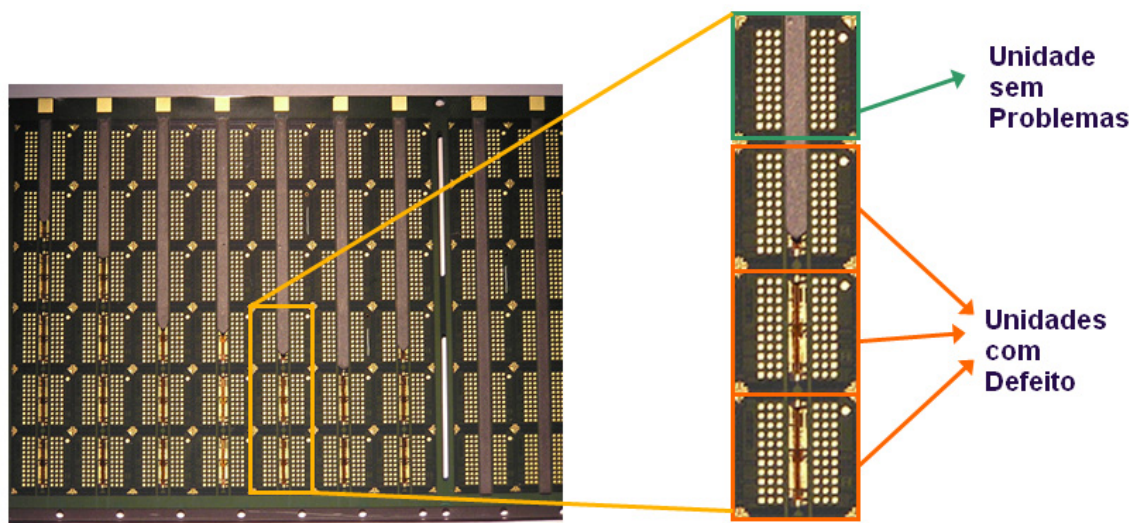


Figura 4.38 - O defeito de *incomplete mold*.

Os BUMs representam uma marca presente em cada unidade que indica o seu estado (ver figura 4.39). Quando marcado, é entendido pelas máquinas e operadores nos processos posteriores que essa unidade está danificada e não deve permanecer na linha de produção após individualização das unidades.

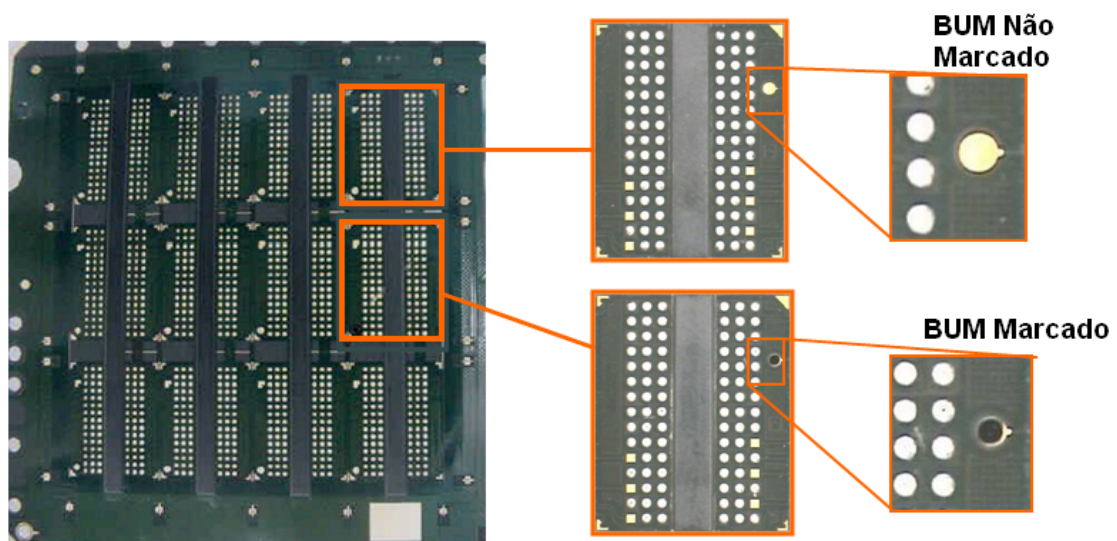


Figura 4.39 - Imagens de BUMs.

4.3.2 Algoritmo de Inspeção

O algoritmo de inspecção é separado em duas fases: a fase de inspecção de defeitos nos *bond channels* e a fase de detecção de BUMs (*Bad Unit Marks*).

No bloco de inspecção dos *bond channels* adquire-se grande parte da informação necessária a ambos os processamentos. A operação chave para todo o algoritmo situa-se na localização das marcas identificadoras da posição dos *bond channels* (ver figura 4.40). Através deste passo (*feature matching*) todos os desvios horizontais são compensados e as restantes posições de elementos dos substratos são determinadas correctamente através de geometria.

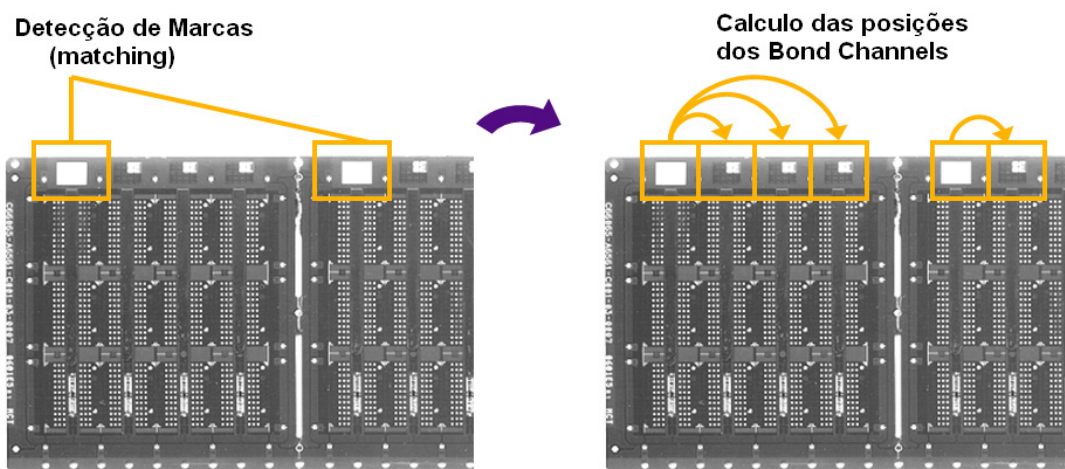


Figura 4.40 - Representação esquemática do processamento da determinação das posições dos *bond channels*.

Algoritmo de *feature matching* para imagens binárias:

```

FOR y = (inicio+margem) TO (fim-margem) DO
  FOR x = (inicio+margem) TO (fim-margem) DO

    Soma=0;
    FOR u = inicio TO fim DO
      FOR v = inicio TO fim DO

        soma=soma+(Padrão(u,v) - (1-Padrão(u,v)) * Imagem(x,y))

      END
    END
    Resultado(x,y)=soma;
  END
END

```

No final da operação de *matching* a matriz Resultado tem coeficientes negativos e coeficientes demasiado elevados, e está desajustada à representação. Para facilitar a análise

desta matriz de correlação é realizado um ajuste da gama dos coeficientes, de forma a poder ser caracterizada por uma imagem de 8 *bits*, ou seja, 256 níveis.

No primeiro ciclo determina-se o valor máximo e o valor mínimo existente, e no segundo ciclo é feita a conversão, com uma “translação” de todos os valores de modo que o valor mínimo coincida com 0 e com uma divisão sobre o coeficiente máximo de forma a que o valor máximo corresponda ao nível 255.

```

Max=0;
Min=0;

FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

    If Resultado(x,y)>Max THEN Max=Resultado(x,y);
    If Resultado(x,y)<Min THEN Min=Resultado(x,y);

  END
END

FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

    Correlação(x,y)=( (Resultado(x,y)+abs(Min)) / (Max-abs(Min)) ) *255;

  END
END

```

As posições são obtidas por análise desta matriz de correlação. Primeiro isolam-se os valores mais altos através de um *thresholding*, depois esses picos (valores a branco depois do *threshold*), que correspondem às posições onde se encontram as marcas são guardados num vector.

```

pos=0;
FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

    IF Correlação_binaria(x,y)==255 THEN
      n=0;
      FOR i=0 TO numero_de_colunas-1 DO

//a função vai verificar se já existe essa coluna guardada no vector Colunas

        IF ((Colunas[i]+margem)>x) AND ((Colunas[i]-margem)<x) THEN
          n=n+1;
        END
        IF n=0 THEN
//caso não exista, adiciona numa nova posição do vector a nova coluna encontrada

          Colunas[pos]=x;
          pos=pos+1;
        END
      END
    END
  END
END

```

```

END
END

```

No final desta função é realizada uma ordenação dos valores de forma a que as posições dos *bond channels* se organizem de forma crescente.

Sabidas as posições verticais dos *bond channels* procede-se ao seu isolamento de forma a obter uma imagem apenas com as zonas do substrato que se pretende analisar. A partir deste ponto, uma operação de *threshold* é suficiente para realçar os defeitos sobre um fundo preto (ver figura 4.41).

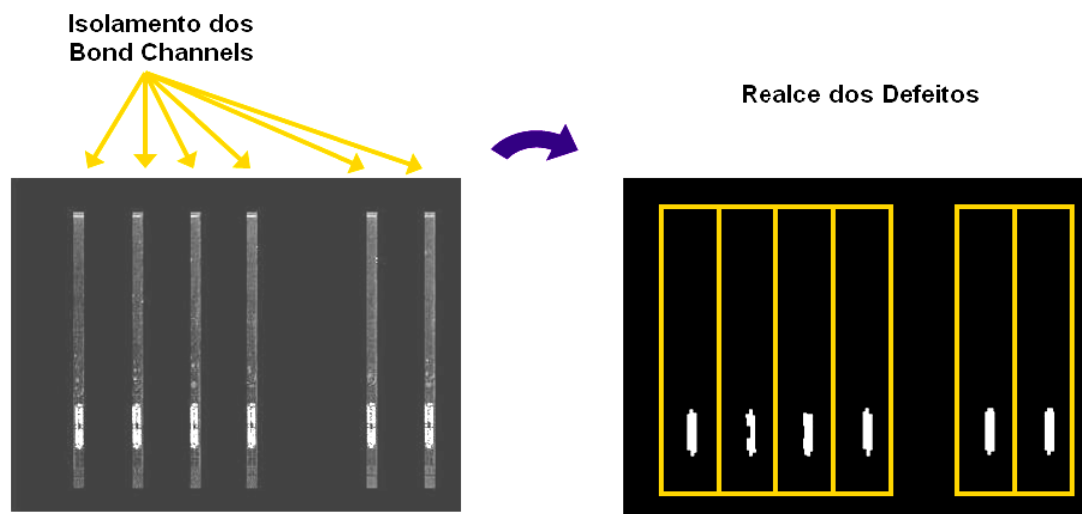


Figura 4.41 - Representação esquemática do processo de isolamento dos *Bond Channels* e de realce dos defeitos.

Processo de Isolamento dos *Bond Channels*:

```

FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO
    FOR i=0 TO numero_de_colunas-1 DO
      IF (x>(Colunas[i]-margem)) AND (x<(Colunas[i]+margem)) THEN
        Imagem_Isolada(x,y)=Imagem_Original(x,y);
      END
    END
  END
END

```

Com este passo termina a inspeção dos *bond channels*. A detecção das *Bad Unit Marks* (BUMs) é feita também recorrendo à posição central dos *bond channels* e recorrendo a uma referência vertical. Neste caso, como os substratos se encontram numa calha fixa, apenas há deslocamento na horizontal permitindo assim utilizar como referência vertical a posição zero.

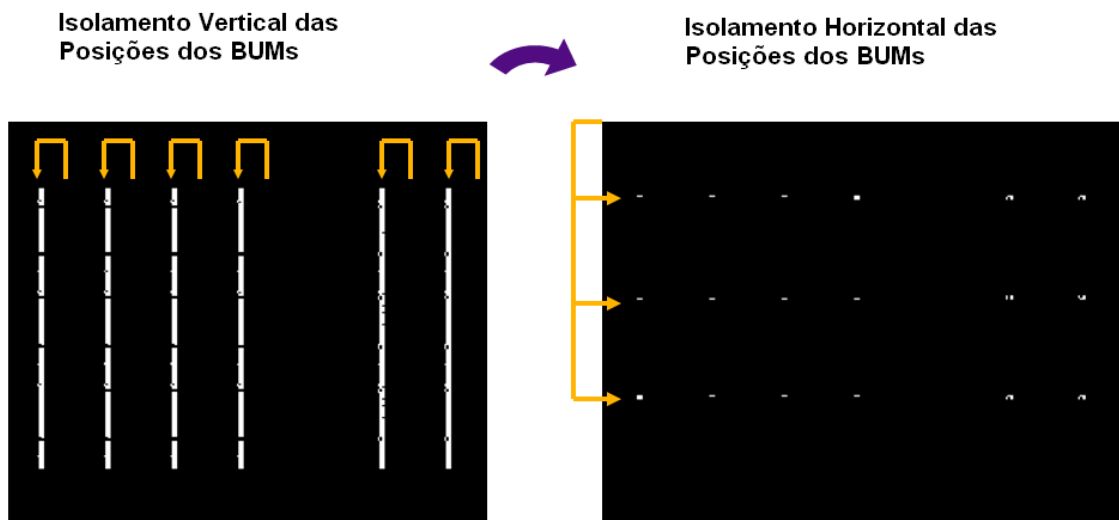


Figura 4.42 - Representação esquemática do processo de isolamento vertical e horizontal das posições dos BUMs.

O isolamento vertical e horizontal é feito com uma espessura programável, a largura em *pixels* dos BUMs depende da resolução da imagem. Após a primeira operação de isolamento e aplicada a operação de *thresholding* é feita uma inversão de cores. Como os BUMs marcados apresentam cor escura, com esta operação um BUM marcado é realçado a branco sobre fundo preto (ver figura 4.42).

O resultado das duas operações de isolamento ainda não apresenta o resultado que se pretende. A cada posição permanecem ainda *pixels* de cor branca, resultado do realce de zonas da periferia do BUM. A resolução deste problema passou pela aplicação de um filtro de erosão (Filtro de Mínimo) que coloca a zero (cor preta) todos os *pixels* presentes na fronteira de uma determinada zona. Isto faz com que apenas marcas mais espessas permaneçam marcadas a branco; essas marcas representam precisamente os BUMs marcados que se pretendem encontrar (ver figura 4.43).

Para imagens binárias este tipo de função realiza-se da seguinte forma:

```
FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

    IF (Algun_dos_8_vizinhos_de_Imagem(x,y)==0) THEN
      Imagem_Resultado(x,y)=0
    ELSE
      Imagem_Resultado(x,y)=1
    END
  END
END
END
```

A operação de enchimento aplicada a seguir (Filtro Máximo) é utilizada apenas com o intuito estético de tornar mais visível a presença dessas marcas sobre o fundo escuro.

O filtro de máximo é realizado de forma idêntica ao filtro de mínimo. Para imagens binárias, processa-se da seguinte forma:

```

FOR y = inicio TO fim DO
  FOR x = inicio TO fim DO

    IF (Algun_dos_8_vizinhos_de_Imagem(x,y)==1) THEN
      Imagem_Resultado(x,y)=1
    ELSE
      Imagem_Resultado(x,y)=0
    END
  END
END
END

```

A imagem a seguir mostra o resultado destas duas últimas operações já com a respectiva marcação das posições correspondentes a cada marca.

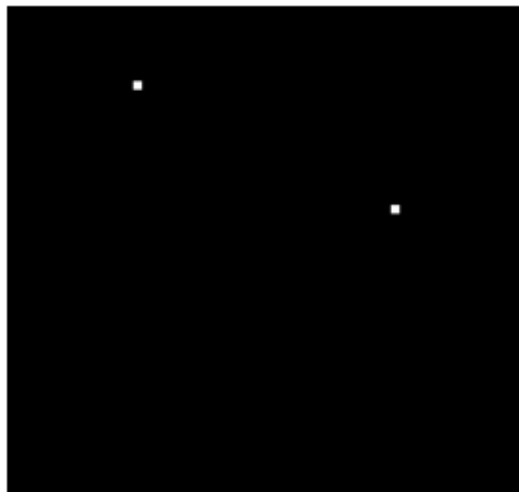


Figura 4.43 - Imagem representativa do resultado da detecção de BUMs.

O seguinte fluxograma ilustra a sequência de processamento. Os blocos laranja representam o processamento comum às duas inspecções, a azul o processamento de inspecção do *bond channel* e a vermelho a detecção dos BUMs.

Fluxograma de funcionamento do algoritmo:

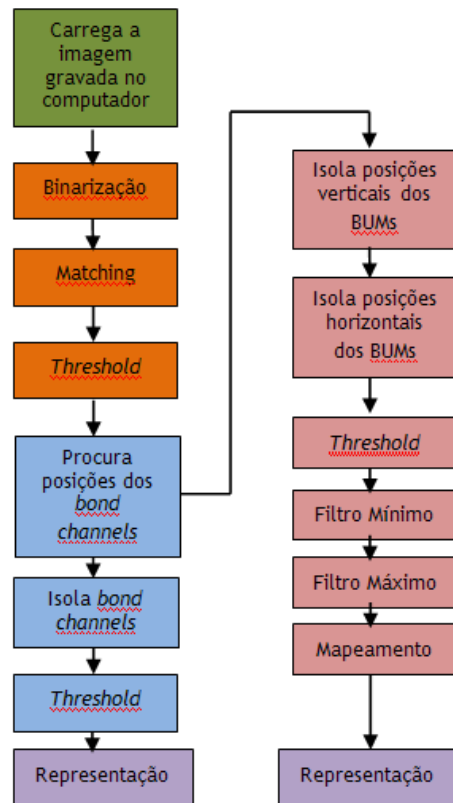


Figura 4.44 - Imagem do fluxograma de funcionamento do algoritmo de processamento.

4.3.3 Resultados

Os resultados deste algoritmo cumpriram todos os requisitos. A geometria do processamento estava configurada a processar um único tipo de substrato (ver figura 4.45).

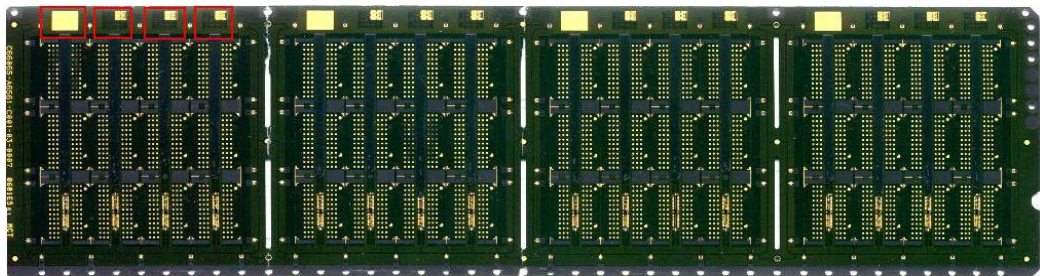


Figura 4.45 - Imagem carregada do computador para inspecção.

Aplicado o algoritmo de *matching* e realizada a operação de *thresholding* sobre a matriz de correlação obtêm-se o seguinte “mapa” de posições dos *bond channels*.

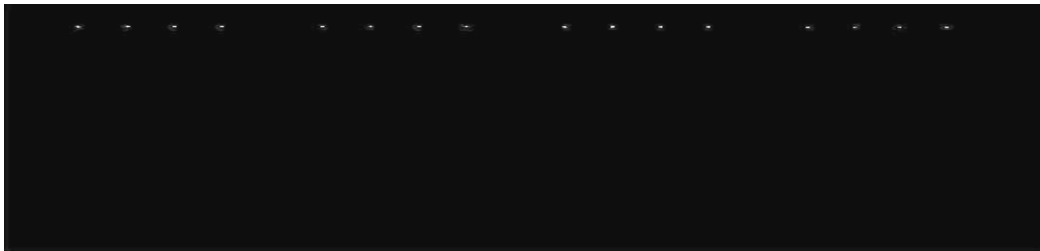


Figura 4.46 - Resultado da procura das marcas identificadoras dos *bond channels*.

Por geometria consegue-se então a zona dos *bond channels* totalmente isolada da restante imagem.



Figura 4.47 - Imagem dos *bond channels* isolados.

Aplicando à imagem anterior uma análise de cor, destacam-se os pontos de brilhos mais elevados.



Figura 4.48 - Resultado da inspeção dos *bond channels*.

No processamento dos BUMs, volta-se ao passo onde foram determinadas as posições dos *bond channels*, processa-se um isolamento vertical e um isolamento horizontal.



Figura 4.49 - Resultado do isolamento vertical e horizontal na inspeção dos BUMs.

Na imagem anterior, manteve-se a representação dos BUMs marcados a escuro. Em base escura torna-se mais difícil de identificar esses casos. Uma inversão das cores dos BUMs, cria um efeito mais esclarecedor.

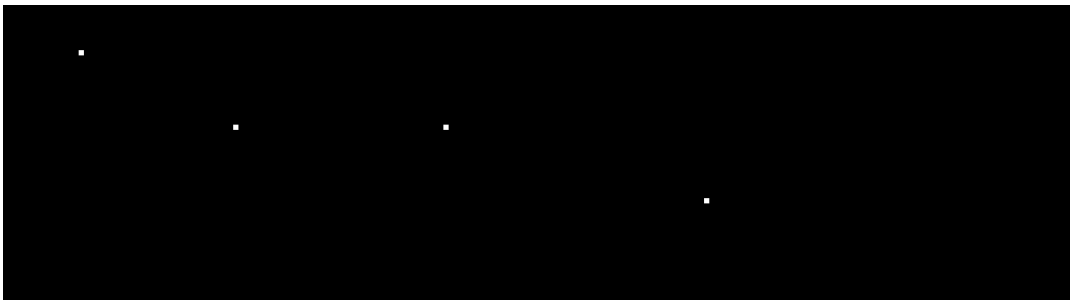


Figura 4.50 - Representação final da inspeção dos BUMs.

5 Implantação Industrial da Inspeção Automática

5.1 Introdução

Este projecto de engenharia surgiu no seguimento da aplicação 4.3 - “Detecção de Defeitos em Substratos de Produção de Memórias SDRAM”. Apresentados os resultados do algoritmo desenvolvido e verificadas as suas potencialidades, houve então o interesse por parte da Qimonda PT em dar seguimento ao projecto e partir para o desenvolvimento de uma aplicação industrial capaz de realizar a tarefa em tempo real.

Este desafio foi recebido ainda antes do início da dissertação pelo grupo que desenvolveu o algoritmo. No primeiro semestre que precedeu à dissertação (entre Outubro 2007 e Janeiro de 2008) foi iniciada a programação do algoritmo de processamento em linguagem de programação *Pascal* sobre o programa de desenvolvimento *Delphi 2007*. Esta linguagem foi escolhida por dois principais motivos. Primeiro, por permitir desenvolver aplicações gráficas bastante completas e robustas (que era um factor importante neste caso) e segundo, por haver por parte do grupo já alguma familiarização com a linguagem. Este último ponto revelou-se crucial uma vez que perante a inexistência de bibliotecas gratuitas que realizassem as funções pretendidas, houve a necessidade de programar de raiz todo o processamento de imagem.

Findada a primeira fase de desenvolvimento, os primeiros resultados estavam já visíveis e foi apresentada uma versão em *pascal* capaz de realizar o mesmo processamento antes executado em MatLab e com tempos de processamento visivelmente mais baixos - mesmo não sendo o tempo de processamento alvo de fortes exigências, havia uma natural preocupação com este factor uma vez que não podia haver margem para o processamento falhar por não estar completo no momento em que uma nova imagem está pronta a ser processada.

Por motivos académicos a continuidade do projecto alterou-se, e a partir de Março de 2008 o desenvolvimento passou a ser realizado exclusivamente pelo autor no âmbito desta dissertação e nas instalações da QPT.

Com o trabalho prévio desenvolvido, o desafio agora seria usar o código do programa desenvolvido e criar a partir daí um sistema de visão industrial. Para atingir esse objectivo diversos requisitos foram identificados à partida:

- Programação e comunicação com câmara
- Projecto de instalação física da câmara e iluminador
- Sincronização do processo de captura com o ciclo produtivo
- Adaptação de programa para funcionamento cíclico
- Robustecer algoritmo de processamento
- Refinar código do processamento de imagem
- Criar aplicação gráfica robusta e de fácil interacção

5.2 A Qimonda Portugal S.A. e Visão Geral do Processo de Produção de Memórias SDRAM

5.2.1 A Qimonda AG

A Qimonda actualmente representa uma das empresas líderes mundiais de produção de memórias DRAM com uma variada gama de produtos para todas as áreas de aplicação - *mobile* (PDAs, Telemóveis e *Smartphones*), aplicações gráficas (placas gráficas e consolas), servidores (*Routers*, *Switches* e armazenamento), computadores *desktop* e portáteis e até aplicações domésticas (*TV Boxes*, reprodutores de DVD, câmaras digitais, etc.).

A empresa gerou a nível global vendas a ascender a 3,61 mil milhões de euros no ano fiscal de 2007, conta já a nível mundial com 13500 funcionários no seu grupo de trabalho e está presente em três continentes (Europa, Ásia e América), [32]. Em Portugal, a Qimonda AG tem um módulo de produção e I&D localizado em Mindelo, Vila do Conde. O pólo abriu em 1997, na altura pertencente ao grupo Siemens/Infineon Technologies. A partir de 2006, depois de concretizado o *spin-off*⁵ da Qimonda AG, o pólo de Vila do Conde passou a integrar este grupo.

⁵ Termo inglês utilizado para descrever uma nova empresa que nasceu a partir de uma outra empresa, uma universidade ou um centro de pesquisas.

5.2.2 Processo de Produção de Memórias SDRAM

A produção de memórias SDRAM pode ser separada em duas grandes etapas: *Front-End* e *Back-End*. Na primeira etapa, é produzida a *wafer* - fina camada de material semicondutor, como o silício, onde através de processos de dopagem, *etching*⁶, deposição e fotolitografia são construídos os circuitos integrados, como é o caso das memórias dinâmicas onde cada elemento de memória diz respeito a um transistor e um condensador responsável por armazenar o valor de um bit. A etapa de *Back-End* recebe as *wafers* produzidas e junta os elementos individualizados (*Dies*) à sua estrutura física de acesso (*package*).

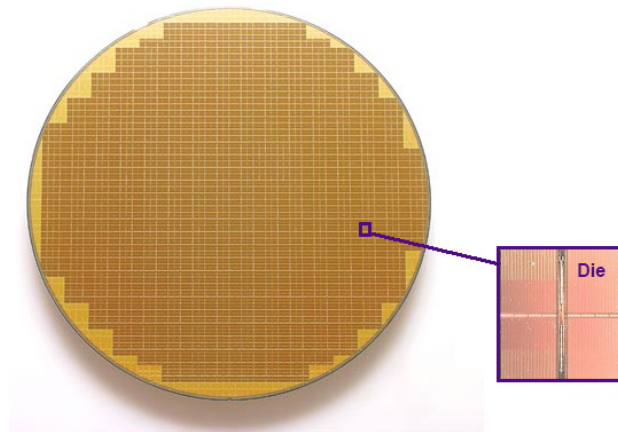


Figura 5.1 - Imagem de uma *Wafer* com realce a uma unidade individualizada (*Die*).

A Qimonda Portugal, na estrutura de produção de memórias da Qimonda AG, é caracterizada por ser uma fábrica de *Back-End*.

O processo de *Back-End* divide-se ainda em dois grandes grupos: *Front of Line* (FoL) e *End of Line* (EoL).

As *wafers* produzidas nas unidades de *Front-End* são recebidas em FoL onde lhes é aplicado o processo de pré montagem. Este processo tem as seguintes etapas:

Laminagem - aplicação de protecção no lado activo da *wafer*.

Desbaste - redução da espessura da *wafer* de $\pm 750\mu\text{m}$ para $380\mu\text{m} \pm 10\mu\text{m}$, ou em alguns casos para $200\mu\text{m}$.

Peeling - remoção da protecção colocada na etapa de Laminagem.

Montagem - colocação da *wafer* numa armação circular, de forma a permitir um manuseamento seguro nas fases seguintes.

⁶ Processo físico-químico de remoção de camadas das *wafers* de silício. O processo é feito geralmente com recurso a máscaras de selecção das zonas a desgastar.

Corte - individualização dos *dies*.

Paralelamente ao processo de preparação da *wafer* é feito também um processo de preparação dos substratos. A fixação dos *dies* só é possível perante a colocação de um adesivo na exacta posição do substrato onde o *die* terá que ser colocado. Esta operação envolve três etapas:

Printing - Colocação do adesivo no substrato.

B-Stage - Cura do adesivo, de forma a melhor a sua adesividade.

Pre-Dry - Tal como indica o nome, consiste numa pré-secagem que elimina humidades no adesivo.

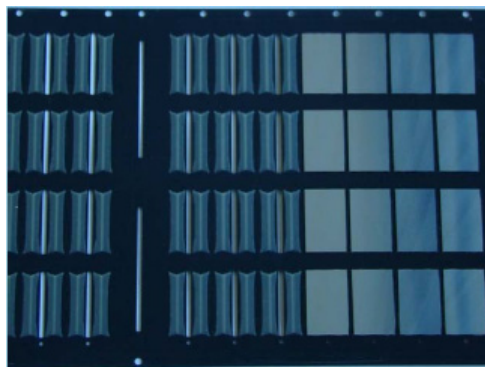


Figura 5.2 - Imagem de substrato com adesivo (elementos à esquerda) e já com o *Die* colocado (unidades à direita).

Terminada a pré montagem e a preparação dos substratos, o processo, ainda em FoL, inicia a fase de *Bond*. Esta fase ainda trabalha com o *die* totalmente exposto, e processa duas operações:

Die Attach - colocação dos *dies* presentes na *wafer* cortada nos substratos com adesivo. O substrato passa a ser o novo suporte físico de transporte dos circuitos.

Wire Bond - processo de ligação física e eléctrica dos *pads* do chip aos contactos do substrato. A ligação é feita com fios de ouro de elevado grau de pureza com cerca de 23,5µm de diâmetro.

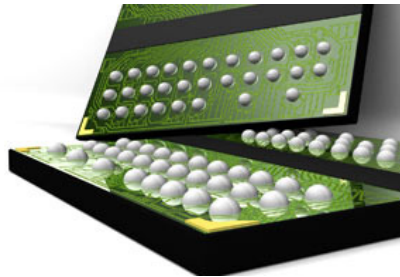
Terminado o *Bond*, finda o FoL e inicia-se o processo de EoL. Nesta próxima fase, ao contrário do que acontece com a anterior, o *die* é encapsulado e não está mais exposto.

A primeira operação chama-se *Mold*. Nesta fase, o substrato é coberto de *Mold Compound*, cuja função é proteger o semiconductor e as ligações de ouro entre este e os contactos do substrato.

O passo seguinte chama-se *Solder Ball Attach* e tal como indica o nome, são colocadas bolas de solda nos pontos de contacto do substrato (*pads*). Estas bolas têm a mesma função

que os pinos num encapsulamento TSOP⁷, permitem o contacto eléctrico com o circuito de memória. Em seguimento desta operação, os substratos passam para o *Reflow* - operação de fixação das bolas de solda através de temperatura.

O processo de montagem é finalizado com a individualização dos componentes com a operação se *Singulation*.



Fonte: www.micron.com

Figura 5.3 - Imagem de componentes individualizados onde são visíveis as bolas de solda nos contactos.

5.3 Enquadramento

5.3.1 O Processo de *Molding*

A operação de *Molding*, processo ao qual será aplicado o sistema de visão, desde a chegada dos substratos até à sua saída envolve as seguintes etapas:

Carregamento de um par de substratos na máquina para a *Turn Table*.

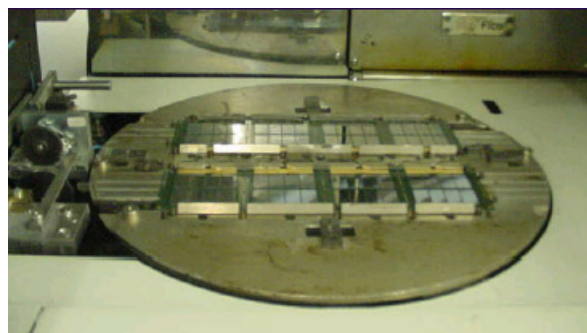


Figura 5.4 - Fotografia de um par de substratos numa *Turn Table*.

⁷ A sigla vem de “Thin Small Outline Package”, e é um tipo encapsulamento ainda usado em memórias dinâmicas e memórias *Flash*, onde os contactos eléctricos se encontram alinhados nas extremidades do encapsulamento.

De seguida, esta roda 90° para possibilitar que o braço mecânico de transporte segure nos substratos e os leve até às *Tools*.

Depois é feita a introdução do par de substratos na *Tool* de injeção de *mold compound* a alta temperatura.

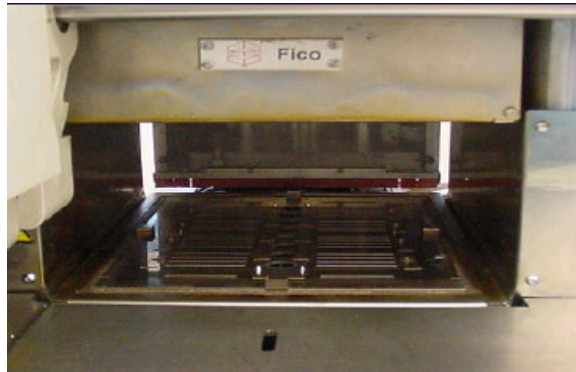


Figura 5.5 - Fotografia de uma *Tool* de injeção de *mold compound* aberta.

Retiram-se depois os substratos da *Tool*, e o *pick and place* transfere o par de substratos para a *Turn Over*.

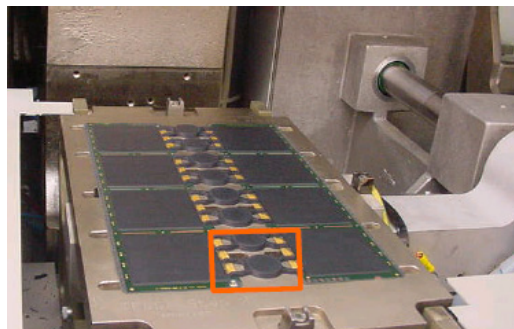


Figura 5.6 - Fotografia de uma *Turn Over* com realce de uma *cull*.

A *Turn Over* transfere os substratos para a *Degating Table* e procede-se a um período de arrefecimento.



Figura 5.7 - Fotografia de uma *Degating Table*.

O excesso de *mold compound* presente entre os dois substratos (*cull*) é removido e é introduzido o substrato na *Unloader*, onde estes são introduzidos novamente em *magazines*⁸.

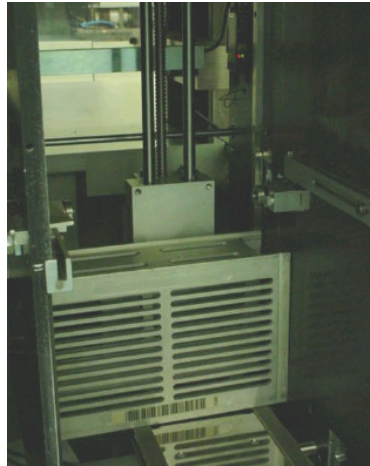


Figura 5.8 - Fotografia de uma *magazine* no interior da *Unloader*.

Cada par de substratos não tem qualquer dependência entre si, a operação é feita sempre aos pares apenas devido à estrutura da máquina. Cada *Tool* de injeção de *mold compound*, tem capacidade para processar dois substratos de cada vez e a falha de um impossibilita a injeção perfeita no outro, daí nunca serem processados substratos em quantidade ímpar.

Nesta operação os defeitos surgem geralmente durante a injeção do *mold compound*, dando origem aos defeitos de *incomplete mold*, *mold bleed*, *mold offset* e *mold flash*.

- Principais defeitos da operação de *molding*

Incomplete Mold

O defeito de *incomplete mold*, tal como induz o nome, diz respeito ao preenchimento deficiente e incompleto dos *bond channels*⁹ com *mold compound*.

Este problema é causado pela introdução incorrecta das *pellets*¹⁰ nas *Tools* de injeção de *mold compound*.

⁸ Suporte metálico onde são transportados os substratos. Cada *magazine* tem capacidade para doze substratos.

⁹ Nome atribuído às colunas/canais onde são feitas as ligações eléctricas entre o *Die* e o substrato.

¹⁰ Designação dada aos pequenos cilindros de *mold compound* antes de serem comprimidos a alta temperatura.

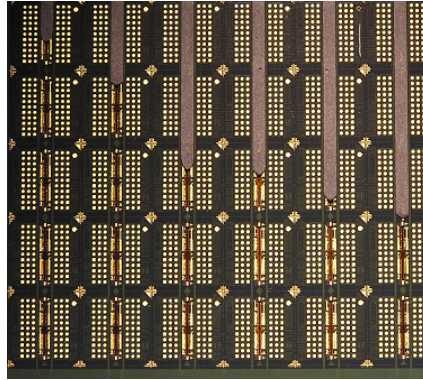


Figura 5.9 - Fotografia do defeito de *Incomplete Mold*.

Mold Bleed

O defeito de *mold bleed* é detectado pela presença de *mold compound* fora dos *bond channels*, preenchendo também a zona dos *pads* onde posteriormente se colocariam as bolas de solda.

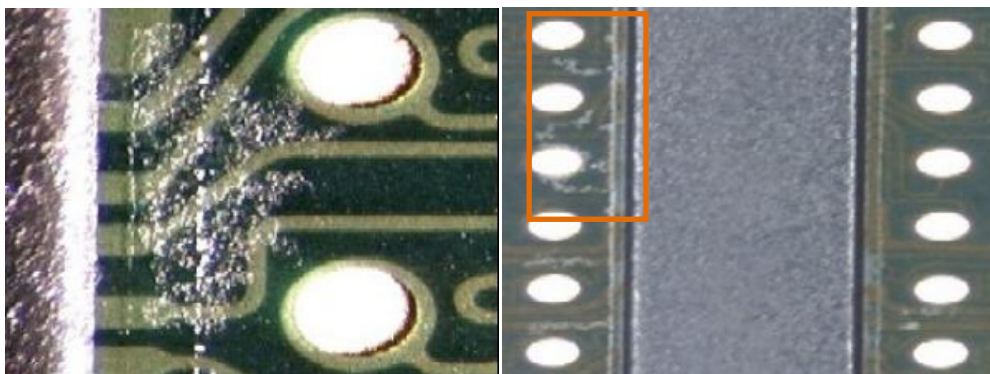


Figura 5.10 - Fotografias do defeito de *Mold Bleed*.

Mold Flash

Este defeito ocorre de forma semelhante ao *mold bleed* mas de uma forma mais grosseira. Neste caso, o derrame de *mold compound* cobre os *pads* quase na totalidade, eliminando de imediato a continuidade das unidades afectadas na linha de produção.



Figura 5.11 - Fotografia do defeito de *Mold Flash*.

Mold Offset

O defeito de *mold offset* dá-se tal como o *incomplete mold* pelo preenchimento defeituoso do *bond channel*. Neste caso o preenchimento é feito na totalidade mas com uma orientação ou com uma posição errada.

Este defeito tem como causa a colocação errada das *Tools* de injeção ou a colocação errada dos substratos dentro destas, bastando um pequeno desvio relativamente à posição centrada para que o molde de injeção não fique perfeitamente alinhado com o *bond channel*.

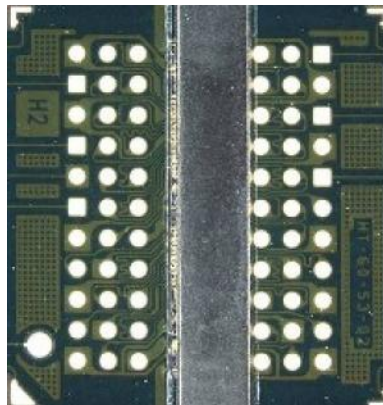


Figura 5.12 - Fotografia de uma unidade com o defeito de *Mold Offset*.

5.3.2 Os Substratos

Actualmente na Qimonda Portugal são utilizados na produção de memórias SDRAM, três diferentes grupos de tipos de substratos: *Step2*, *Step3* e *Step4*. Relativamente aos primeiros mostram agora uma tendência decrescente na sua utilização, o reduzido número de unidades produzidas em cada substrato relativamente aos de *Step3* e *Step4* torna-os pouco rentáveis. O número de unidades em *Step2* varia entre 24 e 64, enquanto que em *Step3* varia entre 60 e 126.

Actualmente *Step3* tem a maior quota de produção enquanto *Step4* (o último modelo a surgir) ainda se encontra numa fase de ascensão. A diferença entre estes dois últimos não é tão significativa como a anterior comparação, mas a diferença é igualmente no número de unidades por substrato e no seu comprimento, em que neste último é superior ao de *Step3*.

Para este sistema de inspeção foram utilizados substratos de tipo *Step2* numa fase inicial de testes e implementação inicial do sistema. A adaptação para substratos tipo *Step3* foi realizada posteriormente numa fase de validação de funcionamento e de resultados, numa máquina com níveis de produção largamente superiores à anterior.

5.3.3 O Problema

As duas funcionalidades são vistas de forma diferente, a detecção do defeito de *incomplete mold* é tomada como de maior relevo dada a importância que existe em não deixar prosseguir substratos com este tipo de defeitos na linha de produção. A detecção e localização dos BUMs funciona como um sistema redundante de informação. Este problema tem ganho maior relevo dada a dificuldade em conseguir controlar a circulação de unidades marcadas. O resultado deste sistema de inspeção vai de encontro a esse problema permitindo com carácter exclusivamente informativo criar registos dos BUMs à passagem da operação de *Molding*.

5.4 Solução Implementada

5.4.1 Instalação do Sistema de Inspeção

A solução projectada para o sistema de inspeção a instalar no equipamento de *Mold* foi dividida em 5 blocos de funcionamento: Captura; Processamento; Controlo; Sinalização e Equipamento (ver figura 5.13).

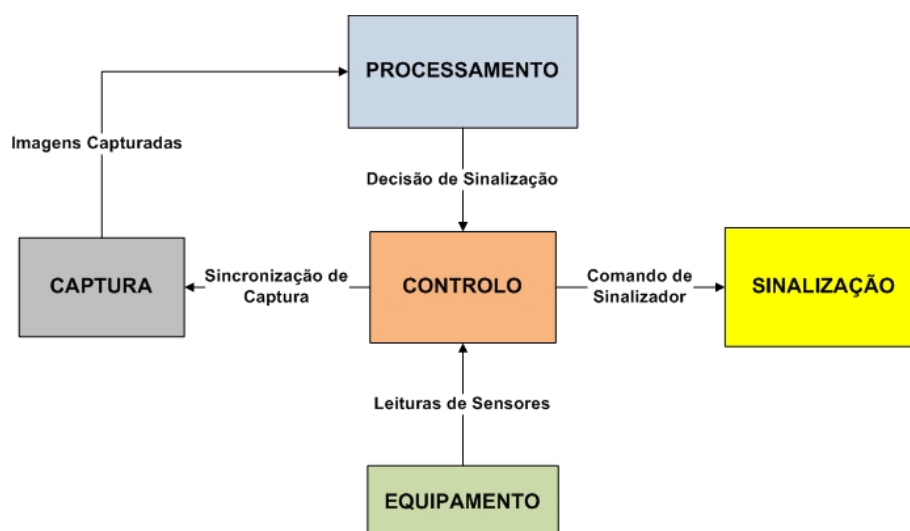


Figura 5.13 - Diagrama de blocos do funcionamento do sistema.

Esta organização pode separar-se em dois grupos de funcionamento. Um grupo responsável pela aquisição das imagens, onde se inclui os blocos de Controlo, Equipamento e Captura. E um segundo grupo responsável pela análise dos dados adquiridos e consequente decisão. Esse grupo abrange os blocos de Processamento, Controlo e Sinalização.

5.4.2 Captura

Do posto de Captura fazem parte a Câmara Linear DALSA GigE Spyder3, Modelo SG-10-01k80-00-R (ver figura 5.14), e o iluminador de LEDs (ver figura 5.15). Como se pode verificar pela análise do diagrama de blocos da figura 5.13 este posto comunica com o bloco de Controlo e com o bloco de Processamento.



Fonte: www.infaimon.com

Figura 5.14 - Câmara DALSA GigE Spyder3 utilizada no projecto.

Características da Câmara:

Resolução de 1024 *pixels*;

Dotada de dois sensores de linha para modo de alta sensibilidade;

Taxa de captura de linhas até 68KHz ;

Transmissão de dados até 100m;

Comunicação por Gigabit Ethernet;

Dimensão de cada pixel: 14x14 μm ;



Fonte: www.infaimon.com

Figura 5.15 - Iluminador de LEDs utilizado.

A sincronização das capturas é um elemento essencial no funcionamento do sistema. Como está a ser utilizada uma câmara linear, ou seja, cada *frame* capturado inclui apenas uma linha, para a maximização da resolução das imagens é importante que sejam apenas utilizados, na construção destas, as linhas capturadas no momento em que o substrato passa sob a câmara. Para isso, configurou-se a câmara a utilizar um *trigger* externo como ordem de captura de *frame*, e criou-se no bloco de controlo um algoritmo responsável por identificar os períodos úteis de captura. Na realidade, o *trigger* é resultado da operação lógica AND do sinal de ordem de captura dado pelo posto de Controlo e um sinal originado por um *clock* interno da câmara, como ilustra a figura 5.16.

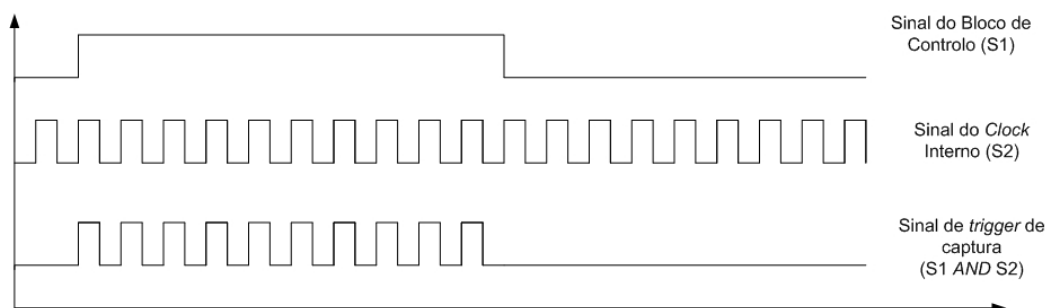


Figura 5.16 - Gráfico representativo dos sinais de controlo de captura da câmara.

O iluminador está ligado à alimentação (12V) através de um transístor comandado pelo sinal de comando do bloco de controlo. Esta ligação foi projectada com base em dois motivos. Um deles, com carácter essencialmente informativo, permite ao utilizador saber os períodos em que a câmara está em modo de captura, e o segundo tem o intuito de preservação do equipamento. Ligando o iluminador apenas em períodos úteis evita-se a utilização desnecessária deste em períodos de paragem prolongados, recuperando assim inúmeras horas de funcionamento dos LEDs e prolongando assim a longevidade do iluminador.

5.4.3 Equipamento

O bloco respeitante ao equipamento representa a Máquina de *Molding* do fabricante holandês FICO utilizada pela QPT para o processo em causa. Neste bloco não houve qualquer intervenção no seu modo de funcionamento, apenas foram realizadas ligações paralelas para leitura dos sensores de início e fim de curso do *Degating*¹¹. A leitura dos sensores é feita através de opto-acopladores, não só devido à diferença de tensão presente no funcionamento dos sensores (24V) e no funcionamento do controlador do bloco de Controlo (5V), mas também para garantir um isolamento eléctrico entre os dois equipamentos. Os sinais recebidos pelo controlador são utilizados para identificar os períodos úteis de captura de imagens.

5.4.4 Sinalização

O bloco de sinalização representa um sinalizador luminoso e sonoro instalado no equipamento.



Fonte: www.werma.com

Figura 5.17 - Torre sinalizadora utilizada.

Este elemento é alimentado a 24V e é controlado pelo bloco de Controlo através de um conjunto de transístores responsáveis por comandar cada uma das luzes e o elemento sonoro

¹¹ Peça metálica do equipamento de *Mold*, responsável por empurrar os substratos para as *magazines* no momento da captura.

separadamente. No final de cada inspecção o sinal permanece ligado durante 2 segundos, de forma a não sobrepor o resultado da inspecção seguinte.

5.4.5 Controlo

O bloco de Controlo é o elemento central do sistema. Funciona como elo de ligação entre o sistema de alto nível e as ligações eléctricas de baixo nível.

Relativamente ao grupo de aquisição das imagens, já foi visto que este bloco é responsável por transmitir à câmara um sinal indicativo dos períodos úteis à captura de *frames*, e que resulta de um algoritmo que tem como entradas os sinais dos sensores de início e fim de curso do *Degating*.

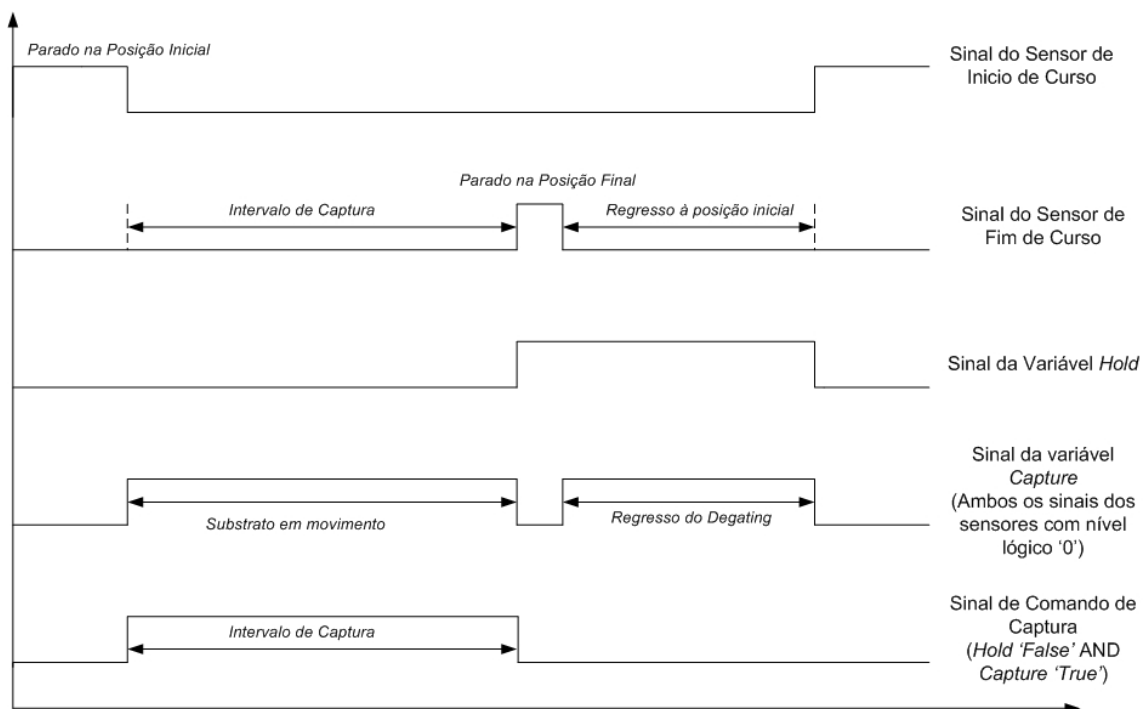


Figura 5.18 - Gráfico representativo dos sinais envolvidos na geração do sinal de controlo de captura.

A lógica de funcionamento deste algoritmo é simples (ver figura 5.18). Partindo do princípio que o período útil de captura corresponde ao período em que o *Degating* está no seu deslocamento positivo (tomando o sentido “Início - Fim” como sentido positivo), surge assim a necessidade de identificar não só os períodos de deslocamento, mas também os seus respectivos sentidos. O primeiro caso é facilmente identificável por corresponder aos períodos em que ambos os sensores não detectam a presença do *Degating* numa das extremidades, ou seja, ambos apresentam o seu sinal a zero. Para o segundo caso, a solução passou pela criação de uma variável auxiliar que entrava na condição final de ordem de captura. Essa

variável binária *Hold* (nome arbitrariamente atribuído), é colocada no seu valor lógico “zero” nos instantes em que o *Degating* passa na posição inicial e alterada para o valor lógico “um” nos instantes em que o mesmo atinge a posição final. Partindo deste ponto, com esta variável activa nos instantes de regresso, esses períodos serão ignorados pelo controlador impedindo que a câmara proceda a capturas nesses instantes.

A figura 5.19 apresenta um fluxograma explicativo do funcionamento acima descrito.

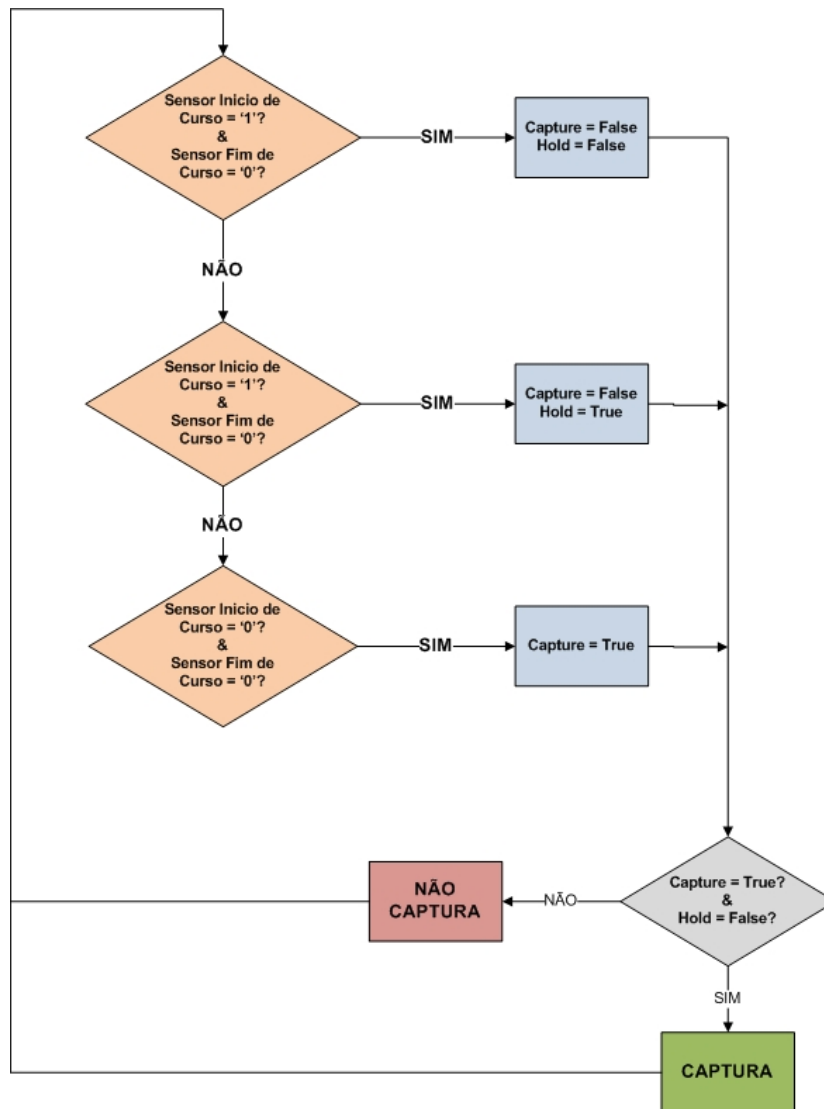


Figura 5.19 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo de controlo de captura.

No grupo de análise de imagem, a acção do bloco de controlo é mais passiva, a sua funcionalidade é neste caso apenas de comunicação. Tomada uma decisão por parte do processador relativa à inspecção de uma imagem, procede-se à actuação da sinalização de forma a informar o operador do resultado dessa inspecção. Essa transmissão de informação é providenciada através do circuito presente no bloco de Controlo, onde os sinais do controlador correspondentes a instruções do Processamento actuam no equipamento eléctrico directamente através dos opto-acopladores.

A transmissão dos dados entre o bloco de Processamento e o de Controlo é feita através de comunicação série.

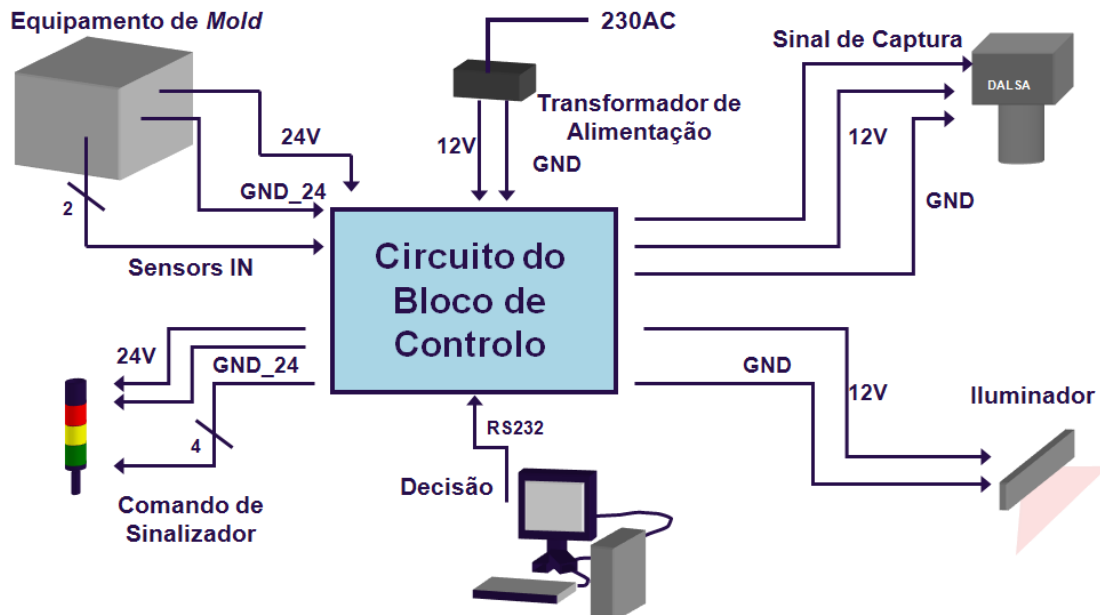


Figura 5.20 - Esquema representativo das entradas e saídas do circuito do bloco de controlo.

O bloco de controlo apresentado na figura 5.20 representa um circuito constituído essencialmente por um microprocessador *Atmel ATMega8* responsável pelas tarefas de processamento de sinais, um *MAX232* responsável por modular os sinais para a comunicação série e seis opto-acopladores que fazem a transmissão dos sinais para os níveis de tensão de 24V (dois para leitura de sensores e quatro para actuação do sinalizador). Neste circuito existem três níveis de tensão: 12V recebidos pelo transformador de alimentação que são utilizados para alimentar a câmara linear e o iluminador; 5V obtidos por regulação dos 12V (através do componente *7805*) utilizado para alimentar a electrónica de sinal - este nível de tensão partilha referência com o nível de 12V; e 24V mantidos totalmente isolados dos restantes níveis de tensão, obtidos pelo equipamento de *mold* e utilizados para actuar o sinalizador.

5.4.6 Processamento

O bloco de processamento tem a função não só de inspeccionar as imagens capturadas, mas também de as construir (ver figura 5.21). Como já referido, a câmara utilizada é uma câmara linear e, por isso, cada *frame* capturado representa uma linha de 1024 *pixels*. Surge

pois a necessidade de fazer a construção da imagem por alocação consecutiva dos *frames* capturados.

A recepção dos *frames* provenientes da câmara é feita por uma aplicação em C++ que corre em paralelo com a aplicação de processamento. A necessidade desta aplicação surgiu da falta de bibliotecas de comunicação com a câmara disponibilizadas pelo fabricante para outras linguagens de programação - neste caso, em *Pascal*, a serem utilizadas pela aplicação de processamento desenvolvida no software *Delphi 2007*.

Com esta aplicação, houve a necessidade de configurar e programar uma ponte de comunicação, entre a referida aplicação em C++ responsável por ler cada *frame* capturado e a aplicação em *Pascal* responsável pela construção da imagem. Esta comunicação é estabelecida através de *sockets*¹². Cada aplicação trabalha como se de uma máquina separada se tratasse, comunicando em Cliente - Servidor. A aplicação *Delphi* funciona como servidor e a aplicação de leitura em C++ como respectivo cliente. A configuração das comunicações entre as duas aplicações foi feita com recurso à biblioteca *WinSock (Windows Sockets)*.

A cada captura, o *frame* presente no *buffer* de captura é colocado num *array* de *bytes* de 1024 posições, correspondendo a cada posição um *pixel* de 8bits. Após recepção do *array* por parte do Servidor, este é adicionado sequencialmente a um *array* de 1024*2048 posições, correspondendo a uma imagem de 2048 linhas com 1024 posições cada. O número de linhas não tem nenhuma razão fixa, apenas corresponde a um valor cuja resolução já permite um processamento correcto das imagens.

Para se conseguir boas resoluções, as capturas das linhas deverão ser feitas perpendicularmente ao movimento do objecto sob a câmara. A orientação dos objectos inspeccionados nas imagens posteriormente construídas fica assim na vertical. Como o processamento de inspecção foi projectado a receber as imagens dos substratos na horizontal, houve a necessidade de introduzir uma transformação de transposição ao *array* de *arrays* que contém a imagem. O redimensionamento realizado à imagem corresponde a uma redução da aresta lateral do substrato transposto de 1024 para 341 *pixels* (um terço da sua dimensão) e uma redução do comprimento do substrato (aresta superior e inferior) de 2048 para 1024 *pixels* (metade da sua dimensão). Estas dimensões permitem resolver 221µm por pixel do que corresponde ao comprimento e 226µm do que corresponde à largura do substrato, o que corresponde a segmentos aproximadamente quadrados por cada *pixel* resultando numa imagem proporcional - não sendo este no entanto um requisito do processamento.

¹² Representa na computação um elemento a ser usado em comunicações bidireccionais em rede de computadores. É uma abstracção computacional que mapeia um computador ou uma aplicação através de um endereço de IP, um protocolo (TCP ou UDP) e uma porta local.

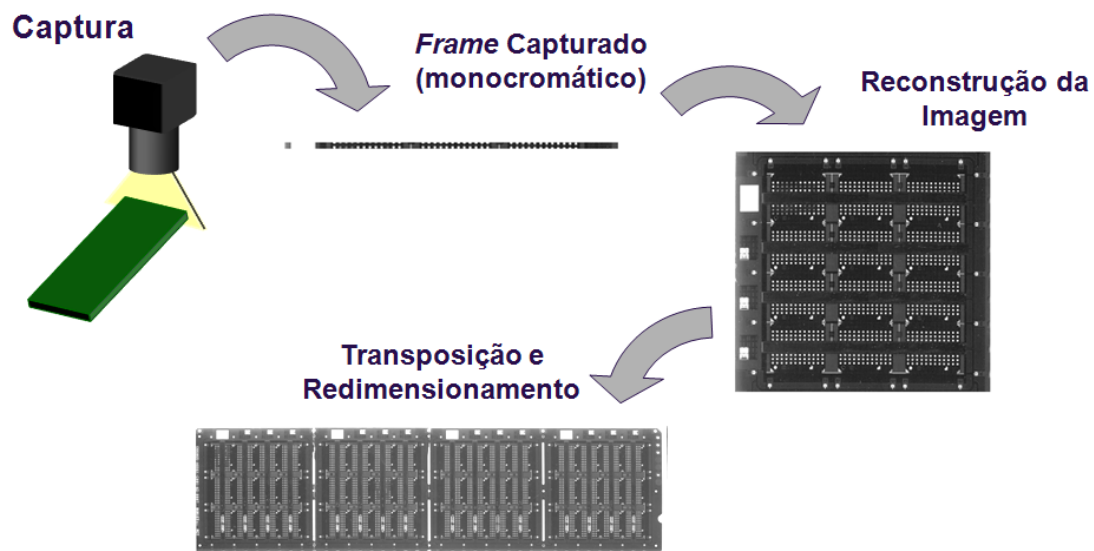


Figura 5.21 - Esquema representativo das operações e transformações de pré-processamento.

O processamento de inspeção de defeitos nas imagens dos substratos será tema de estudo no ponto seguinte.

5.5 Algoritmo de Inspeção

O código em *pascal* já desenvolvido antes de se iniciar este projecto de engenharia foi a base da qual se construiu todo o algoritmo de processamento. Para que pudesse ser utilizado num sistema industrial deste carácter, o programa teve que ser robustecido e cuidadosamente afinado para produzir os resultados pretendidos. Foram adicionadas mais funções não só para ajustes de funcionamento, mas também para executar verificações de estado de forma a ir confirmando se o resultado que está a processar faz sentido ou para otimizar as saídas de modo a ir de encontro às necessidades verificadas. O código foi também revisto quase na totalidade para melhorar desempenho o e evitar bloqueios.

A forma como as imagens são tratadas computacionalmente constitui uma das mais significativas mudanças adoptadas na passagem do código para *pascal*. Enquanto que em MatLab uma imagem equivalia a uma matriz com duas coordenadas referentes a linha e coluna, em *pascal* optou-se pela passagem de cada imagem para um *array* unidimensional. Esta passagem permitiu a alocação da imagem directamente em segmentos de memória do computador sem necessidade de recorrer à *stack* para alocação da imagem enquanto está a ser processada. Esta diferença tem a sua grande vantagem na velocidade de processamento permitindo assim processar imagens com dimensões consideráveis em tempos reduzidos, o

que não acontecia utilizando a *stack*. A sua grande desvantagem é o aumento de complexidade na programação, dado que o acesso a uma posição de uma imagem deixou de poder ser feito directamente como se de uma matriz se tratasse (Imagem(x,y), por exemplo) e passou a ser realizado com recurso a apontadores (o acesso à décima posição da sexta linha partindo do início da imagem, por exemplo, é realizado agora através do incremento do apontador da imagem de $5 \times \text{largura_da_imagem} + 9$ posições).

A nível funcional, a Figura 5.22 ilustra a maior evolução a que o sistema de processamento foi sujeito. A aplicação agora deixa de carregar as imagens já gravadas no computador e passa a fazer a recepção e construção das imagens de forma dinâmica e de forma cíclica. O evento de recepção de novos dados lançado pelo servidor da comunicação dos *sockets* é utilizado para proceder à acção de construção da imagem e processamento. Uma variável auxiliar vai contando o número de linhas recebidas e uma vez completa a imagem, uma *flag* autoriza o início do processamento. O intervalo até à recepção de novos dados (intervalo entre passagens de substratos) é suficiente para que todo o processamento decorra sem problemas e sem riscos de novos dados serem perdidos. A gestão de recepção de dados é realizada segundo o código:

```
EVENTO_NOVOS_DADOS
BEGIN

    IF Nova_Imagem_a_ser_recebida THEN apontador_img=inicio;

    Ler_Buffer_socket();

    IF delay>intervalo_ate_substrato_chegar_à_camara THEN
        IF Imagem_completa==False THEN

            FOR i=0 TO fim_do_buffer DO
                apontador_img^=buffer[i]
                INC(apontador_img);
            END

            ELSE Imagem_completa=True;

        END

    END

    //se a imagem estiver completa pode avançar para o processamento;
    IF Imagem_completa==True THEN
        Transpose_e_redimensiona_imagem();
        Processamento_de_Imagem();
        Imagem_completa=False;
    END

END
```

Iniciado o processamento, após a procura das marcas superiores foi adicionado um ponto de verificação de processamento, isto é, depois de obtido o mapa de correlação identificando

as posições dos *bond channels* o sistema confirma se todos os *bond channels* foram encontrados. Caso haja algum em falta a inspeção é abortada e é lançado um alerta de imagem inválida recebida. Este passo mostrou-se necessário vista a ocorrência de situações em que o substrato não era correctamente capturado o que durante o processamento originava por vezes decisões erradas. O fluxograma seguinte (figura 5.22) ilustra o funcionamento do sistema de processamento.

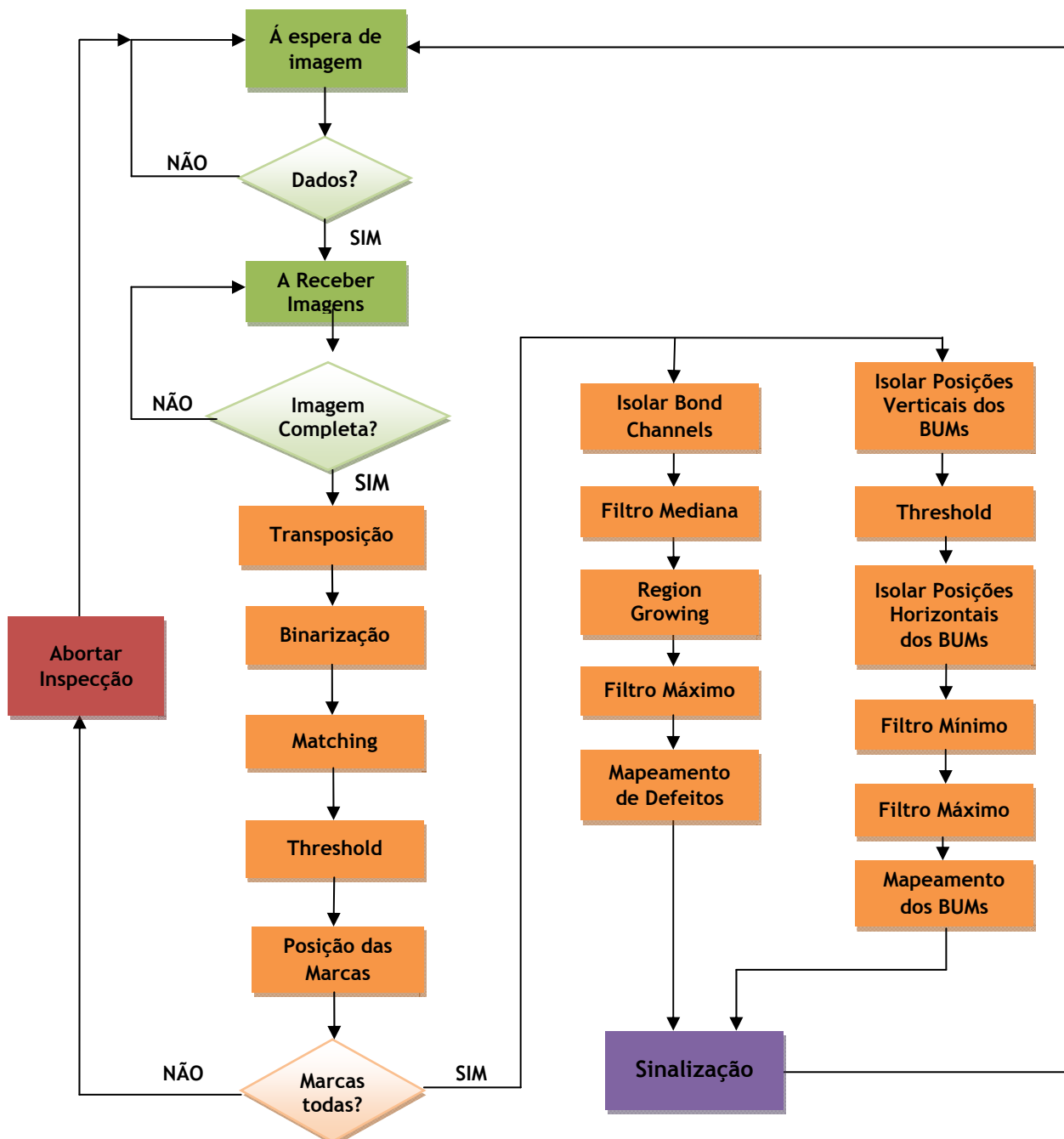


Figura 5.22 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo de recepção e processamento de imagens.

5.5.1 Características Inspeccionadas

A análise do algoritmo de processamento permite encontrar dois passos essenciais ao funcionamento do sistema e à fiabilidade dos seus resultados. Depois da sua localização e isolamento, a identificação dos defeitos é realizada com base numa operação de *region growing/thresholding* cujo nível de comparação foi alvo de cuidadoso ajuste devido às diversas variáveis que o processo de *molding* envolve.

Inspeção do *Bond Channel*

A inspeção do *bond channel*, processo pelo qual é detectado o defeito de *incomplete mold*, tem um nível de comparação que deverá compensar algumas variações de tonalidade do *mold* acima de um nível médio que geralmente apresenta nessa zona. Como resultado de diversas amostragens, conseguiu-se obter um valor médio de 50 (escala de 256 níveis - *pixel* de 8 bits) para essa zona do substrato. No entanto, o aparecimento de *warp*¹³ em alguns substratos, leva a que as pequenas variações da distância entre a superfície do substrato e a lente, provoque ligeiras variações na intensidade dos *pixels* das zonas curvadas. Como exemplo, é apresentado a seguir um desses casos através da amostragem de uma unidade individualizada onde o valor médio dos *pixels* do *bond channel* (zona central do gráfico) é superior ao estipulado - 62 - e o valor máximo é de 73.

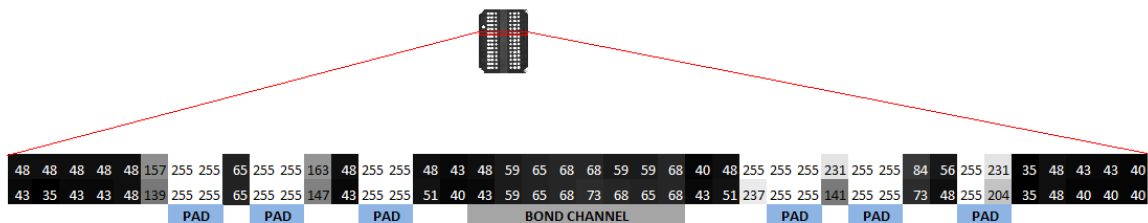


Figura 5.23 - Amostragem de duas linhas de uma unidade individualizada.

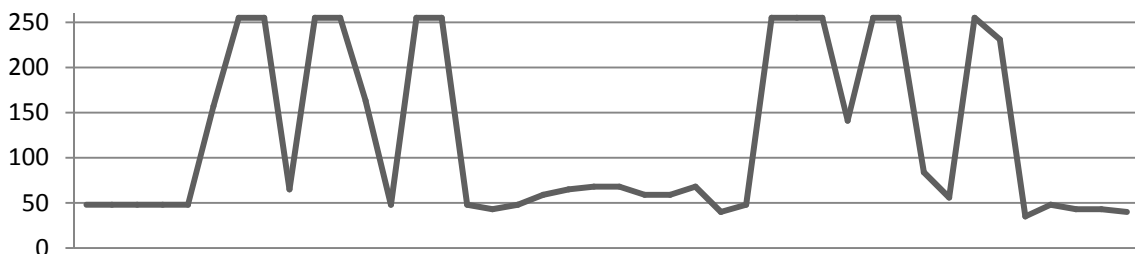


Figura 5.24 - Gráfico dos níveis de intensidades dos *pixels* da unidade da figura 5.23.

¹³ Fenómeno de contracção do *mold compound* que provoca uma curvatura no substrato. Este efeito é provocado por um arrefecimento lento após a injeção do *mold compound* a alta temperatura.

O gráfico da figura 5.24 alinhado com a linha amostrada na figura 5.23, permite perceber a variação de intensidade entre o *mold compound* e as unidades metálicas que provocam grande reflexo da luz emitida. Os três picos presentes em cada lado do *bond channel* correspondem aos *pads* da unidade, cuja superfície reflectora leva a que os *pixels* correspondentes à sua intensidade fiquem saturados. Efeito semelhante acontece no caso do *incomplete mold* onde os fios de ouro provocam uma reflexão da luz bastante superior ao composto de revestimento dos *bond channels*, permitindo assim identificar a presença desse defeito.

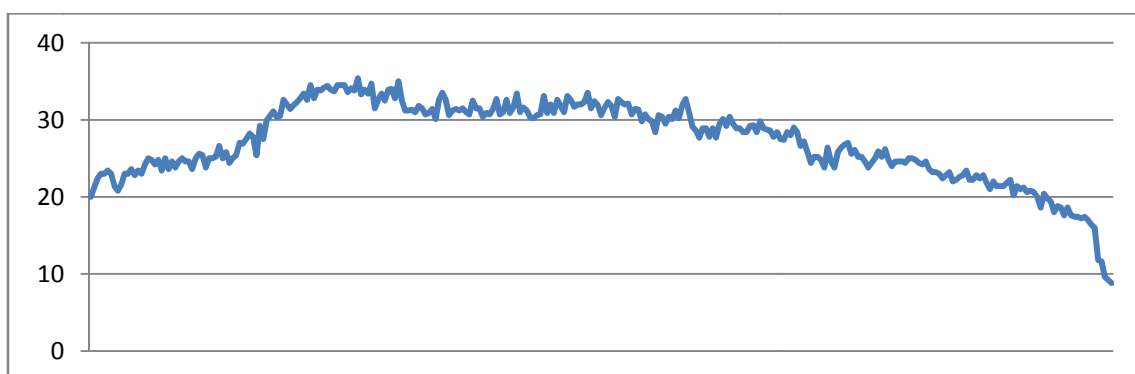


Figura 5.25 - Gráfico dos níveis de intensidades ao longo de um *bond channel* sem defeitos e iluminação normal.



Figura 5.26 - Imagem de um *bond channel* capturada pelo sistema de inspeção onde foi detectado o defeito de *incomplete mold* (imagem rodada de 90°).

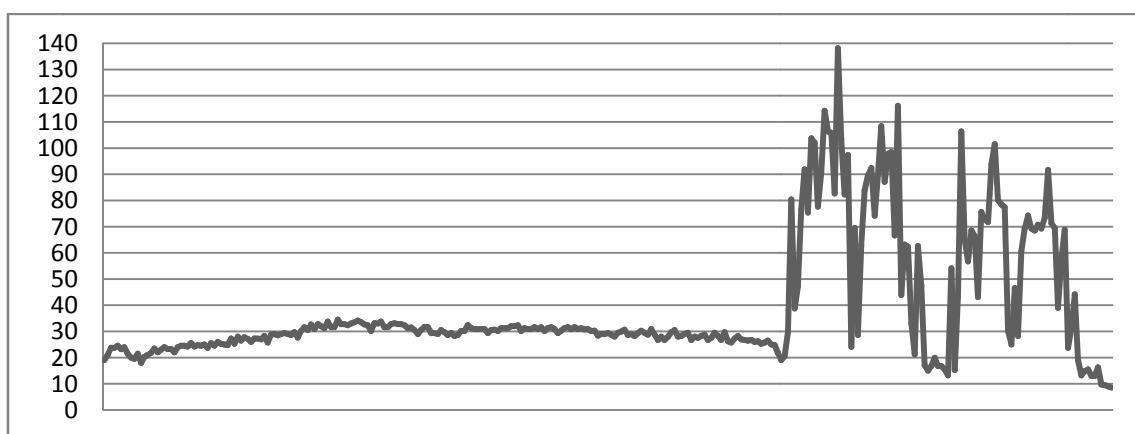


Figura 5.27 - Gráfico dos níveis de intensidades ao longo do *bond channel* mostrado na Figura 5.26.

Como se pode verificar por comparação do gráfico da figura 5.25 com o gráfico da figura 5.27, a presença das ligações de ouro na imagem do *bond channel* capturada pelo sistema de inspecção, cria uma grande variação na intensidade dos *pixels* que permite detectar a presença dessas zonas por análise de cor.

Para além deste caso, verificou-se durante testes operacionais a presença de outros defeitos e problemas no *bond channel* que podem de igual forma ser detectados por análise de cor. Um dos casos, verificou-se pelo aparecimento de partículas soltas de *mold compound* depositadas sobre os *bond channels* que, por provocarem variações ligeiras nos níveis de intensidade de cinzentos nessa zona, foi identificada a sua presença. Verificou-se que a presença destas partículas não constituía um problema assinalável, já que não afectam em nada a qualidade dos elementos de memória e que não justificam a sua sinalização. Por experimentação, percebeu-se que essas partículas nunca levam a intensidades de cinzento no *bond channel* superiores a 80.

Outro problema verificou-se na presença de resíduos de latão nos *bond channels* provocados pela presença desse metal nos moldes das *Tools* de injeção de *mold compound*. Esses depósitos de latão surgem depois das limpezas das *Tools* através da utilização de ponteiros de latão na execução da tarefa. Este defeito leva a que as unidades sejam rejeitadas e daí que houve também interesse na sua detecção, sendo esta no entanto uma ocorrência relativamente controlada. A inspecção por análise de cor permite detectar algumas dessas marcas, dependendo obviamente do seu nível de intensidade (dependente do nível de concentração de latão ao longo do *bond channel*).

Inspeção dos BUMs

A inspecção dos BUMs requer igualmente diversos cuidados no que diz respeito ao nível de decisão de classificação de marca. A janela de inspecção onde é isolada a análise do BUM, foi fixada com dimensões 3x3. Este valor, de facto, representa o tamanho mínimo que esta janela pode assumir devido ao filtro de erosão que é aplicado à imagem depois do isolamento destas zonas. Com um tamanho inferior, o resultado do filtro seria a eliminação de todas as marcas não permitindo que o algoritmo conseguisse identificar qualquer BUM marcado. Um tamanho superior seria admitido, mas com a actual resolução, verificou-se que a janela 3x3 corresponde a uma dimensão próxima à de um BUM o que leva a que zonas de inspecção superiores estariam a analisar diversos *pixels* com segmentos de imagem pertencentes à periferia do BUM, ou seja, dados sem interesse.



Figura 5.28 - Representação das diferenças de níveis de intensidade na janela de análise para um BUM marcado e um BUM não marcado.

As duas representações da figura 5.28, mostram a diferença entre o que pode esperar o sistema de um BUM marcado e de um não marcado. Á partida, um nível de decisão intermédio seria suficiente para a distinção entre o que se considera marca com BUM e marca com o cobre visível, dado que esta última, à semelhança do que acontece com os *pads*, leva à saturação dos *pixels* situados nessa zona. No entanto sendo estas marcas realizadas manualmente por operadores, dão-se casos de marcações defeituosas o que pode levar a erradas decisões por parte do sistema de inspecção. Este facto levou a que o nível de decisão fosse levado para um valor superior, mais próximo da saturação, por forma a que marcações defeituosas não sejam confundidas com BUMs não marcados

5.6 Aplicação Gráfica

A interface gráfica da aplicação desenvolvida em linguagem Pascal no software *Delphi 2007* revelou-se durante o desenvolvimento desta aplicação, um elemento essencial do projecto (ver figura 5.29).

A aplicação é utilizada como elemento complementar de sinalização onde é mostrada diversa informação. Tal como o sinalizador luminoso, este elemento mostra o resultado da inspecção realizada mas complementada com informação relativa à posição dos defeitos e dos BUMs - caso se pretenda, o sistema permite ao operador visualizar a imagem capturada mas omite a visualização do resultado da inspecção dos BUMs. Em simultâneo com a apresentação dos resultados das inspecções, foram colocadas na página principal diversas outras fontes de informação que indicam valores relativos à contagem de substratos perfeitos, substratos defeituosos, unidades onde foram encontrados defeitos, BUMs encontrados na última

inspecção e BUMs encontrados em todas as inspecções realizadas desde o último *reset* aos contadores - este tipo de informação mostrou-se bastante útil aos operadores de máquina que podiam através destes contadores verificar regularmente se houve ocorrências de defeitos em períodos de ausência junto da máquina, por exemplo.

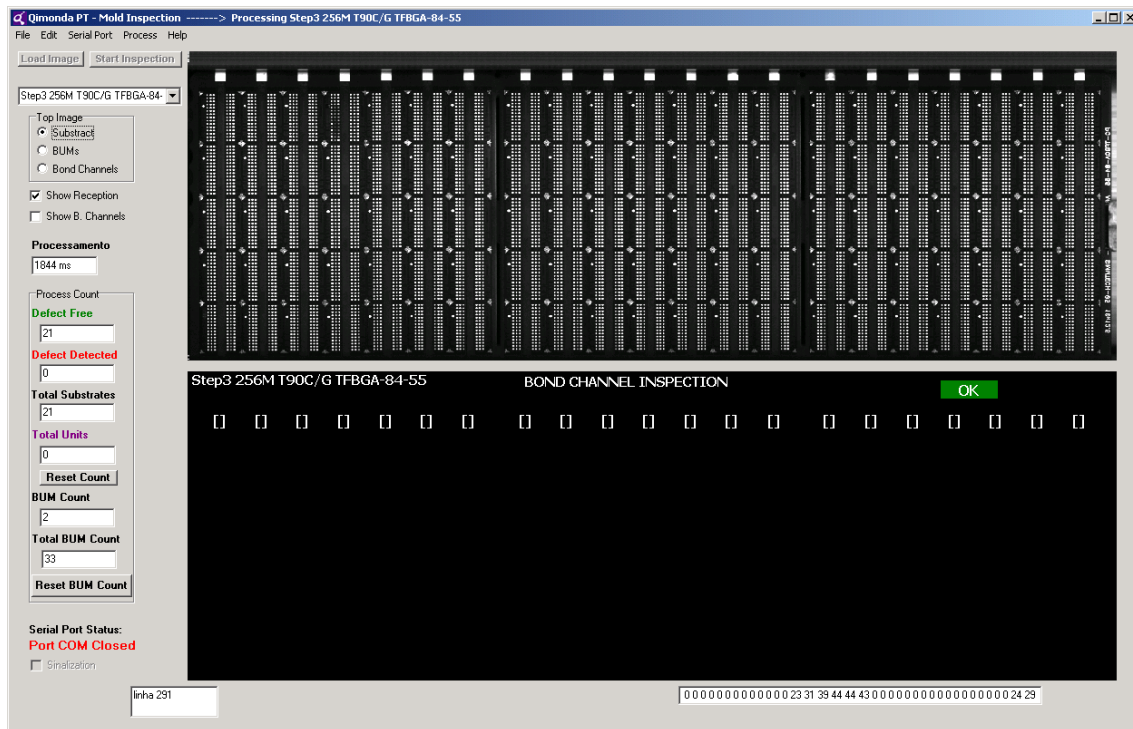


Figura 5.29 - Aspecto do Interface Gráfico.

Paralelamente aos elementos à partida visíveis, a aplicação foi habilitada com a capacidade de gerar e estruturar ainda outros tipos de informação. A geração de um relatório de processo actualizado em tempo real é uma dessas capacidades. Este relatório guarda num ficheiro de texto registos de situação de defeito encontrado e respectivas posições onde foram encontrados, situação de BUMs encontrados e respectivas posições, situação de imagem inválida capturada (imagem em que não foram localizadas todos os *bond channels*) e ainda registos de configuração do programa. Este último ponto regista a alteração da configuração do programa, assinalando no relatório o momento em que determinados botões foram carregados ou determinadas opções foram escolhidas. A inserção desta funcionalidade deveu-se à necessidade de auxílio de informação para perceber a origem de determinados resultados não previstos, e de facto, revelou-se bastante útil uma vez que se verificou com ela que alguns operadores de máquina alteravam sem aviso as configurações do programa. Antes de cada uma das informações registadas, o sistema anota a data e a hora a que essa ocorrência se deu.

Por forma a controlar continuamente os alarmes registados pelo sistema sem necessidade de permanecer constantemente junto da máquina, a aplicação foi programada a guardar a

imagem capturada e a imagem resultado da inspeção em cada situação de defeito encontrado numa directoria seleccionada e com nomes gerados controladamente pelo sistema. Esta funcionalidade permite analisar em qualquer instante posterior à ocorrência do alarme se essa ocorrência foi correctamente gerada ou se se deveu a um falso alarme.

A organização da informação foi mais uma necessidade criada durante o desenvolvimento da aplicação. O método encontrado, de forma a otimizar esta acção foi a adaptação do sistema a exportar os dados relativos aos defeitos e BUMs encontrados e respectivas posições para uma folha de trabalho do *Microsoft Excel*. Esta funcionalidade combinada com funções pré-programadas do *Excel* possibilitou a criação de um banco de dados organizados que gera diverso tipo de informação estatística relativa às inspecções realizadas. A criação de um mapa geométrico de ocorrências, registos de frequência de ocorrências ou gráficos com evoluções temporais do sistema de inspeção são algumas das capacidades desta funcionalidade.

5.6.1 Avisos Gráficos

A sinalização em tempo real da ocorrência das diversas situações, são mostradas pela aplicação gráfica recorrendo a avisos gráficos criados para cada caso. Em caso da inspecção ser realizada, é marcado no canto superior esquerdo da imagem o tipo de substrato inspeccionado (para facilitar a análise futura das imagens gravadas), é colocada a marca “[]” no local onde está presente cada *bond channel* e é assinalado no canto superior direito o resultado final da inspecção (ver figuras 5.30 a 5.32).



Figura 5.30 - Resultado do resultado da inspecção de um substrato sem defeitos.

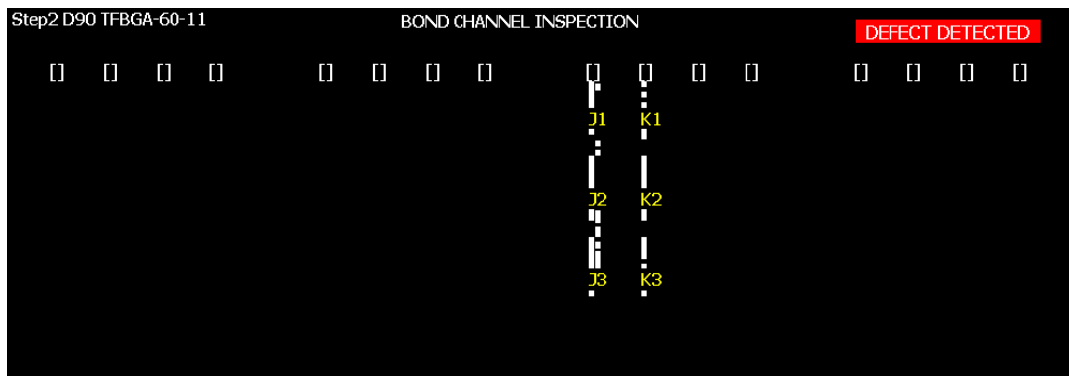


Figura 5.31 - Imagem do resultado da inspeção de um substrato com defeitos encontrados na coluna J e na coluna K.

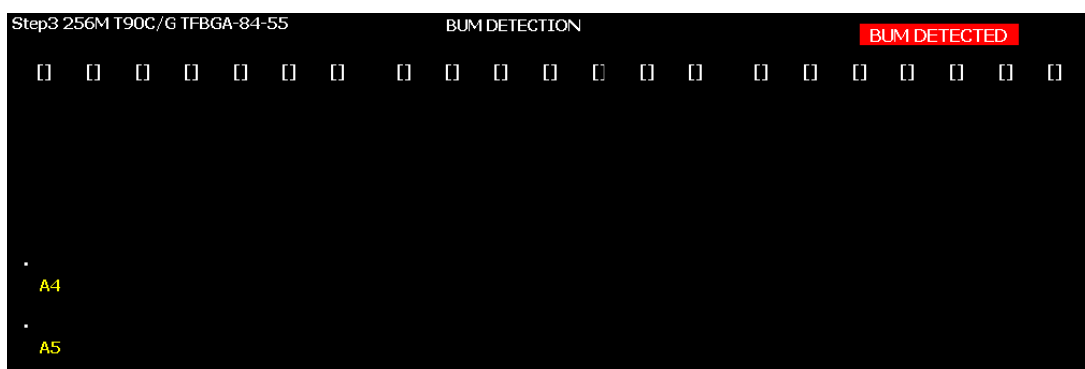


Figura 5.32 - Imagem do resultado da inspeção dos BUMs, neste caso com a localização de duas marcas nas posições A4 e A5.

No caso de a inspeção ser abortada, é mostrada a sinalização alertando aos operadores desse resultado (ver figura 5.33).



Figura 5.33 - Imagem alerta da captura de uma imagem inválida.

5.7 Resultados

Os resultados obtidos no sistema de inspecção visual automática instalado numa das máquinas de *Mold* da Qimonda Portugal foram um pouco mais além do que se esperava inicialmente. O projecto surgiu com a detecção do defeito de *incomplete mold* como objectivo primordial e mesmo com a introdução da contagem dos BUMs como função adicional, a inspecção dos *bond channels* manteve-se sempre como o elemento central do sistema de inspecção.

Findada a programação do algoritmo de processamento e do algoritmo de captura das imagens, iniciou-se a instalação do sistema na Qimonda numa das máquinas de *Mold* com baixos níveis de utilização. Nesta fase era essencial fazer diversas pausas para ajustes e configurações pelo que a opção da escolha da máquina teve isso em conta para que os níveis de produção da Qimonda não fossem nunca afectados. Esse foi um ponto que exigiu uma constante atenção e precaução para que o desenvolvimento deste projecto não interferisse no trabalho da secção de produção.

No momento em que o desempenho do sistema superou toda a fase de parametrização através da definição da instalação física dos equipamentos do sistema de inspecção nas máquinas de *mold*, do ajuste da iluminação e focagem, sincronização com a máquina e ajustes de configurações de processamento para correcta detecção dos defeitos e para funcionamento em ciclo, avançou-se para a instalação do sistema numa máquina de *Mold* com um dos níveis de produção mais elevados.

Com esta fase terminaram os testes de funcionalidade e iniciou-se a fase de teste de fiabilidade e comportamento. O sistema tendeu a exigir cada vez menos intervenções o que permitiu avançar para testes de desempenho mais prolongados.

Como já referido, nos primeiros testes realizados provou-se que a inspecção realizada aos *bond channels* se verificava mais abrangente que o esperado. As marcas de latão (ver figura 5.34) e as partículas de *mold* (ver figura 5.35) surgiram como alvos inevitáveis da inspecção mas para ambos existem já em curso medidas de contenção de ocorrência. Relativamente ao primeiro caso, está em estudo actualmente na QPT a viabilidade de se alterar o tipo de ponteiros que são utilizadas nas limpezas das *Tools*. A alternativa ao latão que está em estudo é a madeira de bambu. No que diz respeito às partículas de *mold compound* a medida que será brevemente posta em prática resulta na instalação de um sistema de limpeza dos substratos por fluxo de ar imediatamente antes da sua passagem sob a câmara de inspecção, capaz de remover esses depósitos indesejados e evitar alertas que não exigem intervenção.

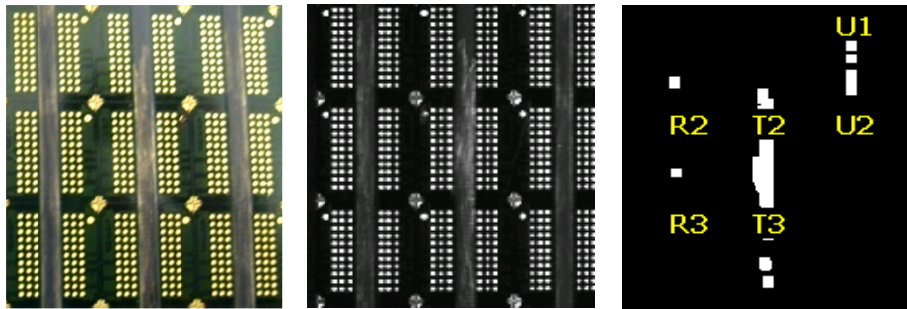


Figura 5.34 - Resultados da inspeção de marcas de latão. Fotografia tirada ao substrato (à esquerda); Imagem capturada pelo sistema (ao centro); Resultado do processamento de inspeção (à direita).

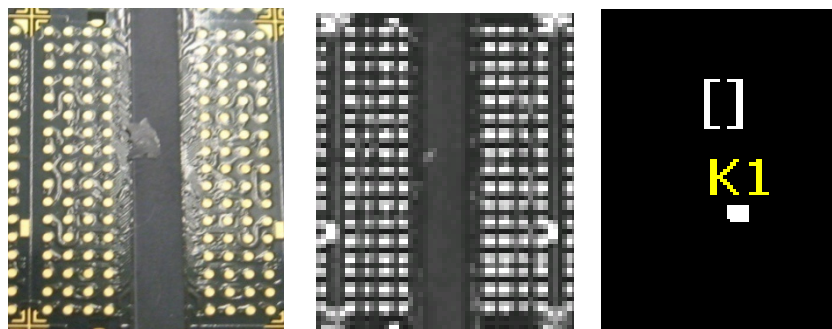


Figura 5.35 - Resultados da inspeção das partículas de *mold compound*. Fotografia tirada ao substrato (à esquerda); Imagem capturada pelo sistema (ao centro); Resultado do processamento de inspeção (à direita).

Como a ocorrência de *incomplete mold* é baixa, para se testar os limites da capacidade de detecção deste defeito em diversas circunstâncias houve a necessidade de provocá-los. Para isso procedeu-se, com a ajuda da equipa técnica da Qimonda, a testes controlados que originassem os defeitos de *incomplete mold* com diferentes níveis de preenchimento do *bond channel*. O resultado permitiu encontrar uma limitação do sistema. A paragem do preenchimento do *bond channel* no momento em que o *mold compound* já cobriu as ligações de ouro da última linha de unidades mas ainda não completou o processo, cria uma situação particular de incapacidade de detecção do problema por parte do sistema de inspeção visual. A razão para essa incapacidade encontra-se na diminuta diferença de intensidade entre o que na imagem corresponde a *mold compound* e ao que corresponde a substrato. Mesmo sendo uma situação muito particular e com baixa probabilidade de ocorrência, a resolução para essa pequena lacuna está no entanto a ser estudada. A solução pode passar pela alteração do sistema de iluminação de forma a melhorar o realce entre *mold compound* e superfície de substrato mas sem prejudicar o que está já neste momento funcional. Todos os outros casos de *incomplete mold* foram detectados pelo sistema (ver figuras 5.36 e 5.37).

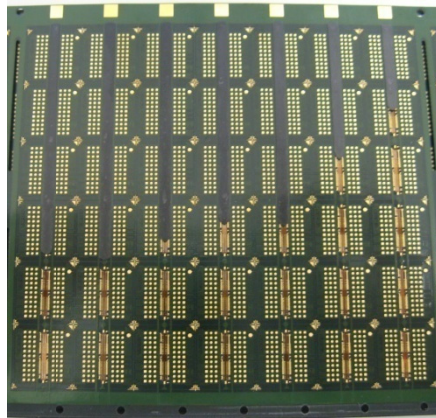


Figura 5.36 - Fotografia de um substrato com *incomplete mold* sujeito a teste.

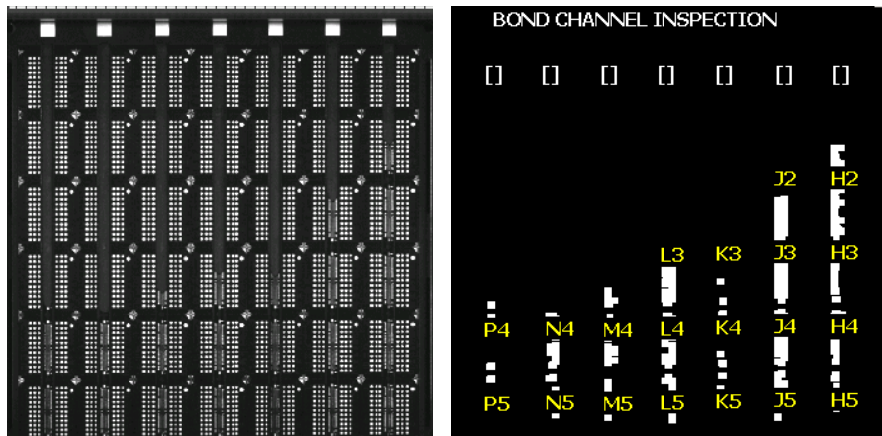


Figura 5.37 - Inspeção do substrato com *incomplete mold* da Figura 5.36. Imagem capturada (à esquerda) e resultado da inspeção (à direita)

A detecção e contagem dos BUMs verificou-se, tal como a inspeção dos *bond channels*, bastante eficaz. Foram realizados três testes controlados, onde todos os substratos inspeccionados pelo sistema foram também inspeccionados visualmente de forma a criar uma base confiável de comparação de resultados. Na totalidade dos três testes foram inspeccionadas 37855 unidades de memória, inspeccionados portanto 37855 BUMs (marcados ou não).

Os resultados do conjunto dos três testes deram origem a 184 Falsos resultados, entre os quais 182 por excesso, ou seja, foram identificados BUMs onde eles não existiam, e apenas em 2 dos casos ocorreram falsos resultados por não detecção. Estes resultados equivalem a uma taxa de 99,52% de resultados certos e 0,48% de resultados falsos.

As causas para os falsos resultados estão no entanto identificadas. As localizações dos falsos BUMs foram estudadas e encontrou-se um padrão, em 98% dos casos o falso resultado ocorria nos quatro primeiros *bond channels*. Por análise do processo percebeu-se que ocorriam por vezes pequenos atritos na passagem da calha da máquina para *magazine*, o que provocava ligeiras variações de velocidade de passagem nesses instantes. A captura do substrato é sensível a essas variações pois prevê uma passagem a velocidade constante e realiza por isso capturas de linhas em intervalos constantes. A razão destas ocorrências também foi estudada e percebeu-se que esses atritos à entrada da *magazine* ocorriam em *magazines* com defeitos na sua estrutura, dificultando o início da entrada do substrato na calha da *magazine*. Em substratos com *warpage* esse problema agravava-se devido à deformação que o substrato apresenta.

De forma a reduzir o impacto destes problemas no processamento, está já em fase de programação um novo método de inspecção dos BUMs que passará a fazer a procura destas marcas na imagem antes da transposição e do redimensionamento. Esta diferença levará a maiores exigências de processamento uma vez que terá que fazer o processamento dos BUMs numa imagem seis vezes maior, mas trará uma maior confiança nos resultados porque a área do BUM é também seis vezes maior e não é por isso tão sensível a variações na captura.

As imagens inválidas têm-se mostrado um factor limitador da abrangência do sistema. Em testes iniciais verificou-se uma taxa de rejeição próxima de 30% das imagens capturadas. Depois de diversas intervenções a nível de processamento essa taxa foi reduzida para 13% no pior caso e 7% no melhor caso (varia conforme o substrato a ser processado), o que representa a gama actual da taxa rejeição de imagens. Este valor no entanto não representa um valor absoluto de imagens não inspeccionadas. Em casos de encravamentos de substratos gera-se mais que um alarme por cada substrato encravado (pode chegar a três alertas) devido à tentativa de desencravamento que a máquina de *mold* executa nesses casos - os movimentos do *degating* nesta operação vão originando períodos de captura com o substrato encravado. Visto isto, o valor real está um pouco abaixo do valor exposto, através de estudos realizados verificou-se que a taxa real se situa aproximadamente entre os 8% (no pior caso) e 6% (no melhor caso) - está já projectado, para ser testado brevemente, um melhoramento do programa do microprocessador do bloco de controlo para que ajude o sistema de processamento a identificar os casos de encravamento melhorando assim o sincronismo com o processo e evitar assim registos repetidos de imagens inválidas para um mesmo substrato.

As causas para essas ocorrências estão no entanto identificadas. Actualmente esse valor deve-se a problemas de processamento do substrato nas operações de produção, o que dificulta que o sistema de inspecção melhore por si só essa taxa. As principais causas para a rejeição das imagens são as marcações a caneta nas marcas que o sistema utiliza para detectar os *bond channels* (cerca de 15% dos casos - ver figura 5.38), a cobertura dessas

mesmas marcas por derrames de *mold compound* (pouco frequente, cerca de 3% dos casos), o encravamento de substratos à entrada das *magazines* na sua passagem sob a câmara (mais frequente, 55% dos casos - ver figura 5.39), deformações na imagem capturada (20% dos casos) ou atrasos aleatórios na captura por parte do computador e outros factores diversos (os restantes 7% - ver figura 5.40).



Figura 5.38 - Imagens de substratos não inspeccionados devido a marcações a caneta nas marcas localizadoras de *bond channels* (realce a vermelho das marcas não detectadas).

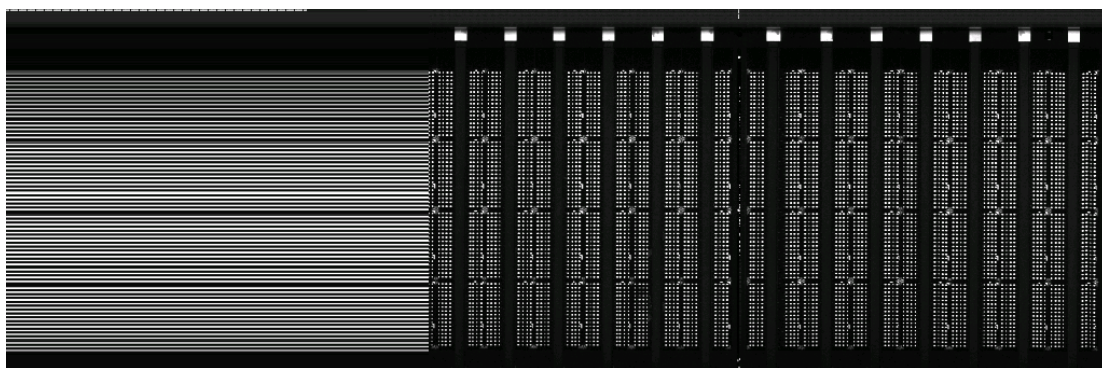


Figura 5.39 - Encravamento do substrato à entrada da *magazine*. A câmara permanece a capturar a mesma linha continuamente.

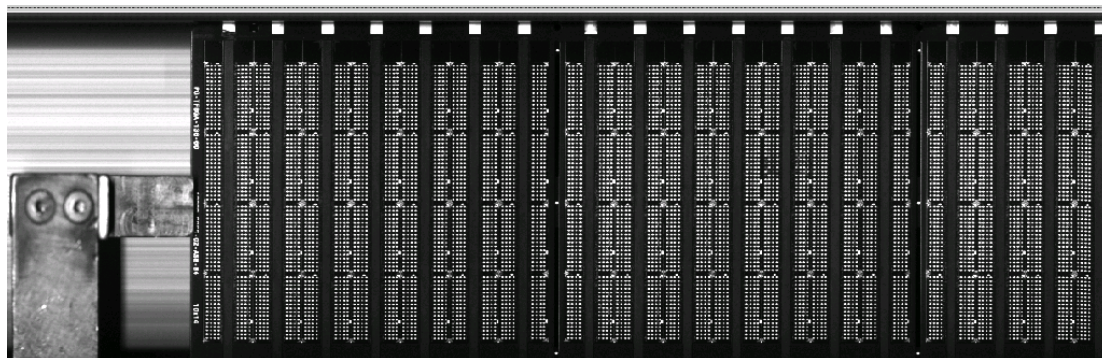


Figura 5.40 - Situação de atraso de captura por parte do computador.

A nível de autonomia, o sistema não mostrou falhas, tem sido criado um registo constante dos dados do sistema que permite um acompanhamento contínuo do seu comportamento. Actualmente o sistema encontra-se em funcionamento contínuo, 24 horas por dia, 7 dias por semana e tem-se mostrado bastante autónomo e robusto, sem problemas de processamento e de comunicação entre todos os elementos do sistema.

5.8 Desenvolvimentos Futuros

Todo o trabalho realizado até à data permitiu medir as potencialidades do sistema de inspeção automática no processo de *Molding*. Os resultados provam a eficácia do sistema e a confiança nos resultados tem sido crescente. A comunicação do sistema de inspeção com o equipamento da FICO para paragem de produção em situação de defeito encontrado, e com o sistema de registo de produção para que a máquina de *mold* partilhe o lote que está a ser processado e permitir com isto associar os registos de defeito e BUM directamente aos respectivos lotes, surgem como evoluções possíveis.

A versatilidade mostrada pelo sistema aliada aos problemas que ainda residem no processo leva a um natural aumento de exigências. A adaptação do sistema à detecção do defeito de *Mold Offset* é um dos passos já estudados e com margem segura para avançar. A detecção de *Mold Flash* e *Mold Bleed* surgem também como interessantes evoluções que permitiriam criar um posto de inspeção a 100% no final da operação de *Molding*. Estes pontos ainda estão numa fase de estudo, mas a criação de um sistema de inspeção global nesta fase do processo é bastante atractiva dado que com estas capacidades seria de facto uma mais valia considerável no que diz respeito ao controlo de qualidade das unidades produzidas na Qimonda.

6 Conclusões

Este trabalho visava um estudo sobre os métodos de inspecção visual automática para controlo de qualidade de objectos planos. Com este fim, foram identificados e distinguidos três grandes grupos de aplicações evidenciados pela realização de três aplicações industriais de controlo de qualidade. Inspecção por análise de textura, por análise de cor e por análise geométrica foram as técnicas estudadas.

Através da aplicação do controlo de qualidade do couro foi possível verificar as dificuldades que existem na inspecção da textura e como esta análise é afectada pela iluminação e pela alteração da imagem a inspeccionar (neste caso pela aplicação de pré-processamento). A diferença dos resultados obtidos entre a aplicação de filtragem de frequência e de orientação também foi visível. No entanto isso não deve ser visto como resultado absoluto, há resultados provados com outras aplicações da eficácia deste método.

Na aplicação do controlo de qualidade de superfícies de madeira, foi possível perceber as possibilidades de aplicação da análise de cor. Em situações que não exijam rigor geométrico e em que existe um fundo aproximadamente constante como base de comparação, estas técnicas são bastante úteis pelos baixos requisitos de processamento exigido.

Através da aplicação por análise geométrica, exemplificada com um caso de controlo de qualidade em substratos de produção de memórias SDRAM, verificou-se a especificidade destes casos. Este tipo de inspecção pode apenas ser aplicado em casos particulares onde o rigor geométrico possa ser levado em conta. Podem, em determinados casos ser conjugados com a análise de cor, por exemplo, mas exigem invariavelmente técnicas de localização e referênciação.

A nível da implementação prática através do projecto desenvolvido na Qimonda Portugal, realça-se a experiência ganha no desenvolvimento deste projecto pelos diversos desafios que foram enfrentados. A necessidade em integrar diferentes tecnologias, a adaptação de um projecto em desenvolvimento a um processo produtivo já existente, o natural aparecimento de problemas à partida não previstos, entre outros casos, foram metas superadas que trouxeram ao estudo dos sistemas de visão industriais um extraordinário acréscimo de conhecimento de engenharia difícil de adquirir de outra forma durante a formação académica.

7 Referências

[1] Mohsen A. Jafari and Yuang Cheng, “Vision-Based Online Process Control in Manufacturing Applications” in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 5, No. 1, January 2008.

[2] Elias N. Malamas, Euripedes G.M. Petrakis, Michalis Zervakis, Laurent Petit and Jean-Didier Legat, “A Survey on Industrial Vision Systems, Applications and Tools” in *Image and Vision Computing*, 21 (2003) 171-188.

[3] Ajay Kumar, “Computer-Vision-Based Fabric Defect Detection: A Survey” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 1, January 2008.

[4] Tadhg Brosnan and Da-Wen Sun, “Improving Quality Inspection of Food Products by Computer Vision - a review”, *Journal of Food Engineering*, 61 (2004) 3-16.

[5] Batchelor, B.G., Hill, D.A and Hodgson, D.C., “Automated Visual Inspection”, *Chapter Two - Economic Considerations*, IFS Publications, UK, 1985.

[6] Donald Braggins, “Vison Today for Assembly Automation” in *Assembly Automation* 26/3 (2006) 181-183.

[7] P. Caleb-Solly and J.E. Smith, “Adaptative surface inspection via interactive evolution” in *Image and Vision Computing* 25 (2007) 1058-1072.

[8] Xianghua Xie and Majid Mirmehdi, “TEXEMS: Texture Exemplars for Defect Detection on Random Textured Surfaces” in *IEEE Transactions on Pattern analysis and Machine Intelligence*, Vol. 29, No. 8, 2007.

- [9] Topi Mäenpää, Markus Turtinen and Matti Pietikäinen, “Real-Time Surface Inspection by Texture”, in *Real-Time Imaging*, 9 (2003), 289-296.
- [10] D. Chetverikov and A. Hanbury, “Finding Defects in texture using regularity and local orientation” in *Pattern Recognition*, 35 (2002) 2165-2180.
- [11] Dah Jay-Lee, James Archibald, Xiaoqian Xu and Pengcheng Zhan, “Using Distance Transform to solve real-time machine vision inspection problems” in *Machine Vision and Applications*, (2007) 18:85-93.
- [12] Fure-Ching-Jeng and John W. Woods, “Compound Gauss-Markov Random Fields for Image Estimation”, in *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 39, No. 3, March 1991.
- [13] Bernd Jahne, Pratical Handbook on Image Processing for Scientific and Technical Applications, Chapter 14 - “Scale and Texture”, CRC Press, 2004.
- [14] Du-Ming Tsai and Tse-Yun Huang, “Automated Surface Inspection for Statistical Textures”, in *Image and Vision Computing*, 21 (2003) 307-323.
- [15] Mihran Tuceryan and Anil K. Jain, *The Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision (2nd Edition)*, Chapter 2.1 - “Texture Analysis”, World Scientific Publishing Co., 1998.
- [16] Rafael Gonzalez and Richard Woods, *Digital Image Processing - Second Edition*, Prentice Hall, 2002.
- [17] M.L. Smith, A.R. Farooq, L.N. Smith and P.S. Midha, “Surface Texture Inspection using Conventional Techniques Applied to a Photometrically Acquired Bump Map” in *Sensor Review*, Vol. 20, No 4, pp. 299-306, 2000.
- [18] Jean-Bernard Martens, “The Hermite Transform -theory”, in *IEEE Trans. Acoust Speech, Signal Processing*, Vol. 38, pp. 1595-1606, 1990.
- [19] Boris Escalante-Ramírez, “The Hermite Transform as an efficient model for local image analysis: An application to medical image fusion” in *Computers an Electrical Engineering*, 34 (2008), pp. 99-110.

- [20] Ahmed Abouelela, Hazem Abbas, Hesham Eldeeb, Abdelmonem Wahdan and Salwa Nassar, “Automated vision system for localizing structural defects in textile fabrics” in *Pattern Recognition Letters*, Vol. 26, pp.1435-1443, 2005.
- [21] K. L. Mak and P. Peng, “An automated inspection system for textile fabrics based on Gabor filters” in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 24, pp. 359-369, 2008.
- [22] Wang J, Campbell R. A., Harwood R. J. “Automated inspection of carpets” in *Proceedings of the SPIE*, Vol. 2345, pp. 180-191, 1995.
- [23] Francesco Bianconi and Antonio Fernández, “Evaluation of the effects of Gabor filter parameters on texture classification” in *Pattern Recognition*, Vol. 40, pp. 3325-3335, 2007.
- [24] Konstantinos N. Plataniotis, Anastasios N. Venetsanopoulos, “Color Image Processing and Applications”, Chapter 1 - “Color Spaces”, Springer, 2000.
- [25] S. J. Sangwine, R. E. N. Horne, “The Color Image Processing Handbook” - Chapter 2 - “Color Science”, Chapman & Hall, 1998.
- [26] S. Borah, E. L. Hines and M. Bhuyan, “Wavelet transform based image texture analysis for size estimation applied to the sorting of tea granules” in *Journal of Food Engineering*, Vol. 79, pp. 629-639, 2007.
- [27] Olli Silvén, Matti Niskanen and Hannu Kauppinen, “Wood inspection with non-supervised clustering”. University of Oulu (gentilmente cedido pelos autores).
- [28] www.aimmp.pt - Associação das Indústrias de Madeira e Mobiliário em Portugal, à data de Maio de 2008.
- [29] www.apic.pt - Associação Portuguesa dos Industriais dos Curtumes, à data de Maio de 2008.
- [30] Armando Jorge Padilha, Francisco Restivo, Pedro Guedes e Célia Silva, “PADEM assessment - leather industry - Final Report”, 1998.

[31] Rui Cardoso e Carlos Teixeira, Relatório do trabalho - “Detecção Automática de Defeitos na Produção de Circuitos Integrados”, DEEC-FEUP, 2º semestre - Ano Lectivo 2006/07.

[32] www.qimonda.com - Página oficial da Qimonda AG, à data de Junho de 2008.