

Efeito dos parâmetros de *Laser Cladding* no comportamento à fadiga de metais

João Pedro Fernandes Varela Lopes

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP (MIEM): Prof. Abílio Manuel Pinho de Jesus

Coorientador na FEUP (MIEM): Eng. Miguel Augusto Vigário de Figueiredo

Coorientador na FEUP (MIMM): Prof. Manuel Fernandes Gonçalves Vieira

Orientador na empresa: Eng. João Cruz



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Setembro 2018

João Lopes, 2018

*” You need to think bigger.
You need to stretch.
The world is not served by you playing small.”
Eric Worre*

Resumo

No âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), a presente dissertação de mestrado foi realizada em parceria entre o Departamento de Engenharia e o Departamento de Qualidade da SERMEC II – Indústria, Comércio e Serviços, S.A. e a SERMEC – *Wind Power*, pertencentes à SERMEC Group. Este trabalho consiste no estudo do processo de fabrico *laser cladding* e todas as suas especificações, dando maior relevância e importância aos seus parâmetros de operação como fator de estudo, de modo a avaliar qual a influência dos mesmos na resistência à fadiga dos materiais processados por esta tecnologia. Também se revela interessante pela parte empresarial e industrial compreender a influência da variação empírica dos parâmetros de operação no resultado e qualidade dos revestimentos obtidos. Através de uma revisão bibliográfica inicial acerca do processo e de conceitos relativos a fadiga, contextualiza-se a situação atual e as expectativas futuras sobre o processo de fabrico. De seguida, destaca-se o trabalho experimental desenvolvido no decorrer do projeto, nomeadamente a definição dos materiais de estudo tendo-se optado pelo ferro fundido nodular GGG70 e o aço de cementação 18 CrNiMo 7-6. Destaca-se ainda a descrição da máquina de *laser cladding* ERLASER® HARD+CLAD que foi utilizada para os variados ensaios realizados e os testes realizados pela ERLAS® que se revelaram uma referência num momento primordial pela informação científica e credível transmitida. O processo de maquinagem dos provetes bem como a própria deposição, parâmetros e materiais envolvidos nos mesmos revela-se crucial na elaboração deste projeto, pois a partir destes foram realizados os ensaios de fadiga nas instalações da instituição de ensino. É de realçar que o uso de potências de *laser* baixas, na ordem de grandeza dos 1000 W, é sempre preferível quando se trata de ferros fundidos; no caso dos aços estes suportam valores de potência de *laser* mais elevadas dadas as suas propriedades mecânicas. De notar também que dada as geometrias limitadas dos provetes, surgem alguns problemas nas deposições, como foi o caso dos repetidos empenamentos detetados, o que limitou também o uso de valores de potências de *laser* superiores e variações mais abruptas das velocidades do processo e taxas de deposições de pós. Por fim, são feitos os ensaios de fadiga nas amostras de aço e ferro fundido e é claro o impacto da geometria dos provetes nesses mesmo ensaios, concluindo-se que a resistência à fadiga decresce aquando do uso do processo *laser cladding*. Contudo, verifica-se uma influência dos parâmetros mais interessante na resistência à fadiga nos aços do que nos ferros fundidos, para potências de *laser*, velocidades de processo e taxas de deposição de pós mais baixas. Para além disso, ainda se comprovam mais roturas na zona de transição para os ferros fundidos do que para os aços.

Palavras-chave: Revestimento, *laser*, parâmetros, provetes, deposições, pós, cordões, camadas, fendas, Inconel 625, ensaios, fadiga.

Effect of the processing of materials by *laser cladding* on fatigue behaviour of steels

Abstract

As a part of the Master's in Mechanical Engineering at the Faculty of Engineering of University of Porto (FEUP), the present dissertation was coordinated with both the Engineering Department and the Quality Department of SERMEC II and SERMEC – Wind Power, belonging to the SERMEC Group. This work consists in a study of the laser cladding process and all its specifications, giving more relevance and importance to the operation parameters of the process, the correlation between them and the fatigue strength of the materials used in this technology. In an industrial and entrepreneurial point of view, it also become interesting to understand the influence of the variation of such parameters on the produced coatings. With an initial bibliographical study about laser cladding and its related fatigue concepts, the present state of development and future prospects of this technology was put into context. Then, the experimental work elaborated during this project is presented, namely, the definition of the materials to use, a nodular cast-iron GGG70 and cemented-steel 18 CrNiMo 7-6. It is also presented the description of the laser cladding machine ERLASER® HARD+CLAD used in several tests and the tests performed by ERLAS®, which were a reference because of its credible scientific information. The machining process of the fatigue specimens as well as their deposition, parameters and materials involved is crucial in the elaboration of this project because, with this information several fatigue tests were performed in the university's laboratories. The use of low laser power, with a magnitude of about 1000 W, is preferable when dealing with cast-iron materials; with cemented-steel higher laser power can be used due to its mechanical properties. Due also to the limited specimen's geometries, some issues with the deposition came up, like the repetitive cases of warping, that limited the use of higher laser power and more abrupt changes in the process velocity and the powder feed rate of the process. Finally, several fatigue tests in cemented-steel and cast-iron samples are executed and it became clear the impact of the specimen geometry in these tests, concluding that the material fatigue decreases with the use of the laser cladding process. However, there is a more interesting influence of parameters on fatigue strength in steels than on cast iron, for laser powers, process speeds and lower powder deposition rates. In addition, there are still more fractures in the transition zone for cast iron than for steels.

Keywords: Cladding, *laser*, parameters, specimens, depositions, powder, tracks, cracks, layers, *Inconel* 625, tests, fatigue.

Agradecimentos

Com a finalização da minha dissertação de mestrado que me concede o grau de Mestre em Engenharia Mecânica, não quero deixar de agradecer àqueles que comigo caminharam nesta fantástica etapa da minha vida, àqueles que me apoiaram nos bons e nos maus momentos, àqueles que me ensinaram e educaram e àqueles que me ajudaram a desenvolver e a crescer como pessoa.

Em primeiro lugar, aos meus pais, eternos amigos, que independentemente das minhas decisões e ações me apoiaram, me suportaram nos momentos menos bons e me aplaudiram nos melhores momentos. Ao meu irmão, Francisco, que por entre intrigas e discussões diárias, me ensinou que podemos aprender todos os dias com os mais novos. Aos meus avós, pela disponibilidade, acessibilidade e pela prioridade que me davam quando eu precisava. Acima de tudo, obrigado pela educação, amizade e amor.

Depois, àqueles que me acompanharam diariamente nas salas de aulas e, essencialmente, fora delas. Aos amigos mais presentes e aos mais ausentes que de alguma maneira me completaram e me tornaram melhor pessoa e melhor cidadão. Sem eles todo este percurso teria sido mais pobre e inútil; com eles foi sem dúvida enriquecedor e eternamente memorável.

Ao meu orientador na FEUP, Eng. Abílio de Jesus, um exemplo peculiar de uma excelente docência durante o meu percurso na faculdade, obrigado pela constante acessibilidade durante os últimos meses, pelo incrível conhecimento científico transmitido, pela compreensão e brilhante gestão e orientação dada à minha dissertação. Um agradecimento pessoal ainda ao co-orientador, Eng. Miguel Figueiredo, pela atenção e conhecimentos dados nos últimos meses da dissertação, bem como ao Eng. Rui Silva, do Laboratório de Ensaios Tencológicos da FEUP. Ainda de salientar, o eficaz contacto realizado pelo Eng. Manuel Vieira do Departamento de Metalúrgica e Materiais da FEUP que permitiu a existência da parceria entre a empresa e FEUP na realização desta dissertação

Devo, ainda, o meu agradecimento especial a um conjunto de pessoas da *SERMEC Group* pelo apoio e dedicação demonstrados. Em primeiro lugar ao meu orientador na empresa, Eng. João Cruz, pela ajuda dada na contextualização do trabalho e na organização inicial do mesmo; em segundo lugar, ao Eng. João Taveira, pessoa humilde, que foi capaz de me transmitir o máximo conhecimento científico que pôde, enquanto lidava com as tarefas diárias da empresa. Por fim, mas não menos importante, um agradecimento ao Marcos Gomes pela ajuda gigante que me deu no momento crucial do meu trabalho e, especialmente, ao António Correia, pelo percurso que fez comigo na empresa, não só partilhando conhecimentos mas fundamentalmente partilhando boas gargalhadas, momentos descontraídos, no fundo, uma boa amizade.

João Pedro Fernandes Varela Lopes, Setembro 2018

Índice de Conteúdos

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento do projeto	1
1.2 A Empresa.....	2
1.3 Objetivos do projeto.....	3
1.4 Metodologia	3
1.5 Estrutura da dissertação	4
2. Revisão bibliográfica sobre <i>Laser cladding</i> e Fadiga.....	7
2.1 Conceito e funcionamento	7
2.2 Vantagens e limitações	10
2.3 Materiais base e de deposição	12
2.4 Parâmetros do processo: <i>Inputs</i> e <i>Outputs</i>	16
2.4.1 <i>Inputs</i> do processo.....	18
2.4.2 <i>Outputs</i> do processo	20
2.5 Aplicações e oportunidades de mercado	23
2.5.1 Revestimento.....	23
2.5.2 Reparação e remodelação de peças.....	24
2.6 Crescimento da indústria e expectativas futuras	26
2.7 Noções e conceitos sobre fadiga	29
2.8 Influência do processo de <i>laser cladding</i> no comportamento à fadiga.....	32
3. Técnicas e procedimentos experimentais	38
3.1 Materiais base	38
3.2 Materiais de deposição	41
3.3 Método de obtenção e preparação dos provetes.....	42
3.4 Máquina de <i>laser cladding</i> usada na SERMEC Group	45
3.5 Provetes revestidos e parâmetros usados	55
3.6 Desempenho dos provetes.....	56
3.7 Máquina de ensaios de fadiga e condições iniciais dos ensaios	58
4. Resultados e discussão.....	59
4.1 Testes feitos pela ERLAS®	59
4.2 Testes preliminares de definição dos parâmetros e do pó de deposição	64
4.3 Deposições nos provetes	81
4.4 Ensaios de fadiga	86
5. Conclusões e perspetivas de trabalhos futuros	99
6. Referências.....	102
ANEXO A: Desenho técnico dos provetes.....	104
ANEXO B: Gráficos dos resultados dos ensaios de fadiga por provete	106

Lista de símbolos e abreviaturas

AISI – *American Iron and Steel Institute*;

CAD – *Computer Aided Design*;

CAM – *Computer Aided Manufacturing*;

CVD – *Chemical Vapour Deposition*;

DSR – *Deep Surface Rolling*;

EN – *European Norm*;

FFZ – *Fast Fracture Zone*;

HB – *Brinell Hardness*;

HRC – *Rockwell Hardness*;

HV – *Vickers Hardness*;

N_i – Vida (ciclos) de iniciação de fenda de fadiga;

N_f – Vida (ciclos) de propagação de fenda de fadiga;

N_t – Número total de ciclos de rotura;

PVD – *Physical Vapour Deposition*;

SEM – *Scanning Electron Microscopy*;

ZTA – Zona Termicamente Afetada.

Índice de Figuras

Figura 1 – SERMEC II (à esq.) e SERMEC - Wind Power (à dir.) (Group 2017).....	3
Figura 2 – Esquematização do processo de <i>laser cladding</i> por injeção de pós com bocal co-axial (Ya 2015).	8
Figura 3 – Bocal não axial (em cima à esq.), bocal radial (em cima à dir.) e bocal coaxial (em baixo) (Wikiwand 2017).	9
Figura 4 – Exemplo do cálculo da diluição.	20
Figura 5 – Regiões admissíveis e inadmissíveis de trabalho em processos de <i>laser cladding</i> (Soares 2014).	22
Figura 6 – Revestimentos de peças na SERMEC Group.	24
Figura 7 – Reparação de um <i>main shaft</i> na SERMEC Group.	26
Figura 8 – Ciclo de fadiga (em cima) e um exemplo da vida de fadiga de dois materiais (em baixo) (Campbell).....	30
Figura 9 – Amostra Tipo I (Chew, Pang et al. 2017).	32
Figura 10 – Amostra Tipo II (Chew, Pang et al. 2017).	32
Figura 11 – Amostra Tipo III (Chew, Pang et al. 2017).	33
Figura 12 – Resumo dos resultados dos ensaios de fadiga realizados por Chew, Pang et al. (2017).	35
Figura 13 – Stock de 18 CrNiMo 7-6 existente na empresa.	39
Figura 14 – Amostras de ferro fundido GGG70 existente na empresa.	40
Figura 15 – Provete de GGG70 após corte (à esq.) e provete de 18 CrNiMo 7-6 após corte (à dir.).	42
Figura 16 – Provete - Perspetiva 1.....	43
Figura 17 – Provete - Perspetiva 2.....	44
Figura 18 – Provete - Perspetiva 3.....	44
Figura 19 – Focalização do <i>laser cladding</i> (GmbH 2015).	46
Figura 20 – <i>Layout</i> do sistema <i>laser</i> existente na empresa (GmbH 2015).	48
Figura 21 – Unidade de processamento <i>laser</i> (GmbH 2015).	49
Figura 22 – Robot com ótica de processamento (GmbH 2015).	50
Figura 23 – Transportador de pós (GmbH 2015).	50
Figura 24 – Cabeçote para têmpera (à esq.) e cabeçote para revestimento (à dir.) (GmbH 2015).	52
Figura 25 – Conexões do cabeçote de processamento (GmbH 2015).	53
Figura 26 – Duas perspetivas da máquina de <i>laser cladding</i>	55
Figura 27 – Provetes revestidos de ferro fundido (à esq.) e aço (à dir.).	56
Figura 28 – Desempeno dos provetes com prensa hidráulica.	57

Figura 29 – Máquina de flexão em 3 pontos usada nos ensaios de fadiga.	58
Figura 30 – Geometria ideal de cordões únicos. (Dierken 2013).	60
Figura 31 – Formação de fendas no material base e no material depositado (Dierken 2013).	61
Figura 32 – Formação de poros nos cordões (Dierken 2013).	61
Figura 33 – Zona termicamente afetada (ZTA) (Dierken 2013).	62
Figura 34 – Formação de fendas em camadas (Dierken 2013).	62
Figura 35 – Formação de poros em camadas depositadas por <i>laser</i> (Dierken 2013).	63
Figura 36 – Offset dos cordões e overlap das camadas (Dierken 2013).	63
Figura 37 – Formação de delaminação (Dierken 2013).	64
Figura 38 – Influência do calor na construção das camadas (Dierken 2013).	64
Figura 39 – Embalagem de pó Fe 39 usado na SERMEC - <i>Wind Power</i>	66
Figura 40 – Amostras de teste de GGG50 com cordões singulares de Fe 39.	66
Figura 41 – Rebarbadora de disco negro (à esq.) e isopropanol, líquido de limpeza das amostras (à dir.).	67
Figura 42 – Cordão 2 (à esq. em cima), cordão 3 (à dir. em cima) e cordão 4 (em baixo) de Fe 39 em GGG50.	67
Figura 43 – Curvas de fluência do <i>Inconel</i> 625 (à esq.) (metco 2016) e embalagem de pó <i>Inconel</i> 625 usado na SERMEC - <i>Wind Power</i> (à dir.).	69
Figura 44 – Amostras de teste de GGG50 com cordões singulares de <i>Inconel</i> 625.	70
Figura 45 – Cordão B (à esq. em cima), cordão C (à dir. em cima) e cordão D (em baixo) de <i>Inconel</i> 625 em GGG50.	70
Figura 46 – Amostras de teste de AISI 4337 com cordões singulares de <i>Inconel</i> 625. .	72
Figura 47 – Cordão 1 (à esq.) e cordão 7 (à dir.) de <i>Inconel</i> 625 sobre AISI 4337.	74
Figura 48 – Cordão 11 (à esq.) e cordão 16 (à dir.) de <i>Inconel</i> 625 sobre AISI 4337. ..	74
Figura 49 – Cordão 20 (à esq.) e cordão 24 (à dir.) de <i>Inconel</i> 625 sobre AISI 4337. ..	74
Figura 50 – GGG50 com multicordões de <i>Inconel</i> 625 (à esq.) e Fe39 (à dir.).	76
Figura 51 – Multicordões de 1 camada de <i>Inconel</i> 625 em GGG50.	77
Figura 52 – Multicordões de 1 camada de <i>Inconel</i> 625 em GGG50.	78
Figura 53 – Multicordões de 1 camada de Fe 39 em GGG50.	78
Figura 54 – Multicordões de 2 camadas de Fe 39 em GGG50. Verificação de alguns problemas consequentes das deposições.	78
Figura 55 – Poro pequeno nos multicordões de 1 camada de <i>Inconel</i> 625 sobre GGG50.	79
Figura 56 – Poros grandes nos multicordões de 1 camada de Fe 39 sobre GGG50.	79
Figura 57 – Fendas nos multicordões de 2 camadas de Fe 39 sobre GGG50.	79
Figura 58 – Exemplo de um cordão de <i>Inconel</i> 625 sobre AISI 4337 que sofreu um pré-aquecimento entre 150-200°C, onde se verifica uma ZTA mais homogênea que os	

exemplos anteriores, contudo o resultado do cordão é mau, apresentando dimensões fracas (altura $\approx 0,22$ mm) e diluições na casa dos 60%.....	80
Figura 59 – Duas perspectivas de alinhamento dos eixos da máquina.	82
Figura 60 – Enchimento da panela de pó com <i>Inconel</i> 625.....	83
Figura 61 – Condição inicial de deposição dos provetes.....	84
Figura 62 – Provette de ferro fundido (em cima) e provete de aço (em baixo) depositados.	84
Figura 63 – Exemplo do empeno criado nos provetes de aço.	85
Figura 64 – Resultados dos provetes de aço.....	89
Figura 65 – Resultados dos provetes de ferro fundido.	89
Figura 66 – Fenda central do provete de ferro fundido 1	91
Figura 67 – Fenda na interface do provete de ferro fundido 2.	91
Figura 68 – Fenda central ocorrida no desempenho do provete de ferro fundido 3.....	91
Figura 69 - Fenda central do provete de ferro fundido 4.....	91
Figura 70 – Fenda central do provete de ferro fundido 5.	92
Figura 71 – Fenda central do provete de aço 6.....	92
Figura 72 – Fenda central do provete de aço 7.....	92
Figura 73 – Fenda central do provete de aço 8.....	92
Figura 74 – Fenda central do provete de aço 9.....	93
Figura 75 – Fenda central do provete de aço 10.....	93
Figura 76 – Fenda central do provete de ferro fundido 11.	93
Figura 77 – Fenda central do provete de ferro fundido 13.	93
Figura 78 – Fenda central do provete de ferro fundido 14.	94
Figura 79 – Fenda na interface do provete de ferro fundido 15.	94
Figura 80 – Fenda central do provete de aço 16.....	94
Figura 81 – Fenda na interface do provete de aço 17.....	94
Figura 82 – Fenda central do provete de aço 18.....	95
Figura 83 – Fenda na interface do provete de aço 19.....	95
Figura 84 – Fenda na interface do provete de aço 20.....	95
Figura 85 – Resultados Ferro Fundido: Provete 1.....	107
Figura 86 – Resultados Ferro Fundido: Provete 2.....	107
Figura 87 – Resultados Ferro Fundido: Provete 4.....	107
Figura 88 – Resultados Ferro Fundido: Provete 5.....	107
Figura 89 – Resultados Aço: Provete 6.	107
Figura 90 – Resultados Aço: Provete 7.	107
Figura 91 – Resultado Aço: Provete 8.....	107

Figura 92 – Resultados Aço: Provete 9.	107
Figura 93 – Resultados Aço: Provete 10.	107
Figura 94 – Resultados Ferro Fundido: Provete 11.	107
Figura 95 – Resultados Ferro Fundido: Provete 13.	107
Figura 96 – Resultados Ferro Fundido: Provete 14.	107
Figura 97 – Resultados Ferro Fundido: Provete 15.	107
Figura 98 – Resultados Aço: Provete 16.	107
Figura 99 – Resultados Aço: Provete 17.	107
Figura 100 – Resultados Aço: Provete 18.	107
Figura 101 – Resultados Aço: Provete 19.	107
Figura 102 – Resultados Aço: Provete 20.	107

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Composição química da <i>Stellite 6</i> (Soares 2014)	14
Tabela 2 – Composição química do <i>Inconel 718</i> (Soares 2014)	15
Tabela 3 – <i>Inputs e outputs</i> do processo de <i>laser cladding</i> por injeção de pós (Schneider 1998, Toyserkani, Khajepour et al. 2005)	17
Tabela 4 – Composição química do aço de cementação (Aços 2017)	38
Tabela 5 – Composição química do ferro fundido nodular GGG70 (Dijkkmap 2015)..	40
Tabela 6 – Principais propriedades mecânicas do GGG70 (Dijkkmap 2015).....	40
Tabela 7 – Lista de pós analisados	41
Tabela 8 – Parâmetros do processo de <i>laser cladding</i> segundo a máquina usada (Dierken 2013).....	54
Tabela 9 – Parâmetros usados nas deposições dos provetes	56
Tabela 10 – Composição química do Eutroloy 16604 (Dierken 2013).....	59
Tabela 11 – Resultados dos testes realizados pela ERLAS (Dierken 2013)	59
Tabela 12 – Propriedades mecânicas dos materiais GGG50 e GGG70 (Dijkkamp 2015)	65
Tabela 13 – Composição química do Fe 39 (Voestalpine 2016).....	65
Tabela 14 – Parâmetros usados e respetiva taxa de diluição dos cordões de Fe 39 em GGG50	68
Tabela 15 – Geometrias dos cordões obtidos com Fe 39 em GGG50.....	68
Tabela 16 – Composição química do <i>Inconel 625</i> (metco 2016).....	69
Tabela 17 – Parâmetros usados e respetiva taxa de diluição dos cordões de <i>Inconel 625</i> em GGG50.....	70
Tabela 18 – Geometrias dos cordões obtidos com <i>Inconel 625</i> em GGG50.....	71
Tabela 19 – Composição química do AISI 4337 (Universal Afir - Aços Especiais e Ferramentas)	71
Tabela 20 – Propriedades mecânicas do AISI 4337 (Aços 2017)	72
Tabela 21 – Parâmetros usados e respetivas taxas de diluição dos 24 cordões de <i>Inconel 625</i> sobre AISI 4337	73
Tabela 22 - Geometrias dos 6 cordões escolhidos obtidos com <i>Inconel 625</i> sobre AISI 4337	75
Tabela 23 – Parâmetros usados, respetivas taxas de diluição e especificações dos 4 conjuntos de multicordões de <i>Inconel 625</i> em GGG50.....	77
Tabela 24 – Geometrias obtidas para os conjuntos de multicordões com <i>Inconel 625</i> e Fe 39 sobre AISI 4337.....	77
Tabela 25 – Informações relativas às deposições com melhores propriedades.....	81
Tabela 26 – Resultados sintetizados dos ensaios de fadiga nos 20 provetes.....	87

1. Introdução

A presente dissertação está inserida no plano de estudos do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (MIEM) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), na especialização de Produção, Conceção e Fabrico. O projeto apresenta como tema principal, o estudo do processo *laser cladding*, mais especificamente visa compreender o efeito dos parâmetros do *laser cladding* por injeção de pós no comportamento à fadiga de substratos de aço e ferro fundido revestidos.

O *laser cladding* por injeção de pós recebeu uma atenção significativa nos últimos anos devido às suas características e capacidades em várias indústrias envolvendo revestimentos metálicos, reparação de componentes de alto valor, fabrico aditivo e fabrico de materiais de baixa série. Este processo é uma tecnologia interdisciplinar emergente que combina tecnologia *laser*, desenho assistido por computador e fabrico CAD/CAM, robótica, sensores e controlo, tecnologia de pós metálicos com uma fusão seguida de solidificação rápida desses pós. Desenvolvimentos adicionais a esta técnica estão relacionados com a otimização das tecnologias envolventes e a compreensão da interconexão entre essas tecnologias e a qualidade do processo. Com o rápido crescimento das aplicações do *laser* e a redução dos custos dos sistemas associados aos mesmos, o processamento de material com *laser* ganhou importância numa variedade de indústrias. Setores automóvel, aeroespacial, naval, bélico e tantos outros setores estão amplamente a adaptar a tecnologia *laser* para soldadura, corte e endurecimento e/ou cementação (Toyserkani, Khajepour et al. 2005).

A tecnologia de revestimentos metálicos *laser cladding* encontra uma aplicação particular na reparação de elementos de órgãos mecânicos de grandes dimensões e elevado custo, tais como rodas dentadas e eixos usados, por exemplo, em geradores eólicos. Estes componentes mecânicos estão sujeitos a ações dinâmicas, sendo assim, são suscetíveis à fadiga. A escolha dos pós para o revestimento dos substratos assim como a escolha dos parâmetros do processo é algo que carece de investigação, sobretudo se se pretender obter uma maximização da resistência à fadiga.

1.1 Enquadramento do projeto

No seguimento de um contacto empresarial surgiu esta propostas de projeto com o tema: “Efeito dos parâmetros de *laser cladding* no comportamento à fadiga de metais”, projeto este realizado em parceria entre a empresa SERMEC - *Wind Power* e a empresa SERMEC II – Indústria, Comércio e Serviços, S.A., ambas pertencentes à SERMEC Group, e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Como já contextualizado atrás, o *laser cladding* consiste num método emergente que suscita bastante interesse no seu desenvolvimento e evolução tanto no campo académico como no setor industrial. Assim sendo, este projeto apresenta relevância para ambas as organizações envolvidas pois permite explorar uma área ainda pouco desenvolvida e que certamente trará vantagens positivas para o futuro da engenharia, especialmente a engenharia mecânica, metalúrgica e de materiais.

De realçar que este projeto só foi possível graças à disponibilidade do *robot* equipado com cabeça *laser* existente na empresa SERMEC, adquirida há cerca 2 anos. O presente estudo será uma mais-valia contribuindo para um melhor uso da máquina e entendimento do funcionamento do processo.

É ainda relevante mencionar que na empresa SERMEC – *Wind Power*, este projeto foi realizado com o envolvimento dos departamentos de Engenharia e de Qualidade, cabendo a estes a parte técnica/prática realizada com a máquina de *laser cladding*. Na empresa SERMEC II – Indústria, Comércio e Serviços, S.A., este projeto contou com a contribuição dos centros de maquinagem, nomeadamente de máquinas fresadoras e retificadoras entre outras, que foram imprescindíveis à preparação dos provetes necessários ao estudo.

1.2 A Empresa

A SERMEC Group divide-se em 4 empresas: a SERMEC II – Indústria, Comércio e Serviços, S.A., a SERMEC – *Wind Power*, Weartech – Representações e Serviços Industriais, Lda. e Ibermill®. Este grupo tem mais de 60 anos de atividade e tem mantido como motivação primordial atuar junto das necessidades dos seus clientes, pelo que tem desenvolvido uma estrutura qualificada e modernizada, apostando na permanente inovação tecnológica como resposta aos desafios do mercado. Este grupo foi criado para dar resposta às dificuldades que existiam na execução de serviços metalomecânicos de precisão, contudo apenas tomou o nome de SERMEC em 1985. Numa terceira renovação, a empresa adotou a designação atual de SERMEC2 (Group 2017).

Os principais clientes da SERMEC Group são as siderurgias, cordoarias, cimenteiras, refinarias entre outras, estando assim presentes nas seguintes indústrias e áreas de negócio: metalúrgico; extração; biomassa; eólico; indústria alimentar; construção e fabrico de papel. A sua atividade principal é a produção, reparação e comercialização de ferramentas e peças de alta precisão, em vários metais ferrosos e não ferrosos, de acordo com os projetos e requisitos exigidos. O serviço de manutenção e acompanhamento complementa a atividade da empresa. Em suma, o SERMEC Group tem como missão “prestar serviços para a indústria em geral, comercializar produtos para a manutenção industrial e para a indústria metalomecânica, que se traduzam por aumentos de desempenho, do valor acrescentado e do domínio tecnológico quer para os Clientes, quer para a Empresa” (Group 2017).

Como já mencionado anteriormente, o presente trabalho foi realizado em conjugação entre a FEUP e as duas primeiras empresas aqui mencionadas, pelo que de seguida se apresenta as áreas de atuação de cada uma delas. Assim, a SERMEC II – Indústria, Comércio e Serviços, S.A. (Figura 1) e a SERMEC – *Wind Power* (Figura 1) dedicam-se à reparação e fabrico de engrenagens através de retificadoras, à inspeção visual remota através de videoscopia, a alinhamentos, à reparação e fabrico de veios e chumaceiras, à análise de vibrações, à termografia e à engenharia inversa. Tudo isto acontece em oficina, no entanto, as empresas também se dedicam à manutenção no local, como por exemplo, a substituição dos rolamentos do eixo de alta velocidade de uma turbina eólica (Group 2017).



Figura 1 – SERMEC II (à esq.) e SERMEC - Wind Power (à dir.) (Group 2017).

1.3 Objetivos do projeto

Este projeto visa compreender e aprofundar o conhecimento científico relativo à tecnologia inovadora do *laser cladding*, ajudando o grupo SERMEC a desenvolver este processo, através da geração de novos conhecimentos técnicos e científicos. Em particular, pretende-se, aprofundar conhecimentos sobre o funcionamento de uma máquina de *laser cladding* cobrindo os seguintes pontos: as suas especificidades, as suas regras de funcionamento, as suas regras de segurança e, acima de tudo, os parâmetros de processo envolventes e que caracterizam o resultado dos revestimentos executados. Verificou-se que o método que a empresa adotava não seguia as metodologias mais corretas de funcionamento do processo, pois a definição dos parâmetros específicos da máquina e do processo eram concluídos exclusivamente pela via empírica. Assim, pretende-se realizar uma análise de todo este processo visando melhorias do mesmo.

Para além dos objetivos gerais referidos, a avaliação do comportamento de materiais revestidos por *laser*, quando sujeitos à fadiga, também é um objetivo deste projeto, procurando-se perceber de que maneira as deposições efetuadas em provetes influenciarão as propriedades de resistência à fadiga dos materiais testados. Ora, para isso, conceitos relacionados com a fadiga serão abordados.

No fundo, este projeto tem como principal objetivo implementar melhorias no setor do *laser cladding* da empresa com vista à utilização ideal da máquina e a obtenção de resultados otimizados, principalmente direcionados para o comportamento dos materiais à fadiga.

1.4 Metodologia

Nesta secção pretende-se revelar a metodologia seguida durante todo o período de realização desta dissertação, quer o trabalho desenvolvido na empresa, que o trabalho desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Os primeiros meses deste projeto tomaram lugar no Grupo SERMEC, mais propriamente nas instalações da SERMEC – *Wind Power* e da SERMEC II – Indústria, Comércio e Serviços, S.A. como já referido anteriormente. Assim sendo, numa primeira fase o método de trabalho seguido passou por averiguar os materiais disponíveis na empresa e aqueles que, ao mesmo tempo, seriam interessantes do ponto de vista de estudos à fadiga. Optou-se pela análise de um aço de cimentação e um ferro fundido nodular. Estando esses

materiais definidos, seguiu-se com o estudo da melhor abordagem para o fabrico e a produção dos provetes necessários à realização dos testes mencionados, tendo-se optado pela maquinagem para preparação dos substratos. Em simultâneo com a produção desses provetes, realizaram-se testes preliminares de deposições em patelas/substratos de diferentes tipos de aços e ferros fundidos e materiais de deposição, de modo a avaliar-se os parâmetros mais indicados a usar nas deposições dos referidos provetes.

Acabada a maquinagem dos provetes, passou-se às deposições nos mesmos com os parâmetros definidos nos testes de deposições preliminares. Esses parâmetros foram escolhidos tendo por base os resultados dos testes preliminares feitos e a experiência e conhecimento na área dos engenheiros e técnicos da empresa. Deu-se assim por terminado o trabalho no Grupo SERMEC, pelo que o restante trabalho apresentado foi realizado na FEUP, mais propriamente no Laboratório de Ensaios Tecnológicos (LET).

Nesse laboratório, foi possível usar uma máquina de ensaios de fadiga eletromecânica de flexão em três pontos, de modo a serem realizados os ensaios de fadiga dos provetes previamente preparados. Também foi necessário proceder ao desempenho prévio dos provetes numa prensa hidráulica, pois como resultado das deposições dos revestimentos, foi observado um empeno significativo nos mesmos. Por fim, analisaram-se os resultados dos ensaios e retiraram-se as conclusões necessárias e pertinentes relativas a todo o projeto realizado na empresa e na FEUP, com especial foco no processo de *laser cladding* e a otimização do mesmo, na máquina usada no grupo SERMEC e os provetes lá depositados e, claro, os resultados de resistência à fadiga.

1.5 Estrutura da dissertação

Este subcapítulo apresenta a forma como o trabalho foi organizado e o planeamento das tarefas executadas.

Neste presente capítulo, o primeiro, é feita uma ligeira introdução ao tema principal do trabalho: o *laser cladding*. Seguiu-se a apresentação da empresa onde foi realizado este projeto em parceria com a instituição de ensino, bem como as motivações e objetivos que levaram a que esta dissertação tivesse um rumo e um propósito. Por fim, enquadra-se todo o trabalho e apresenta-se o método utilizado quer na empresa quer na Faculdade de Engenharia para que se obtivessem os resultados desejados.

No segundo capítulo apresenta-se uma contextualização do tema principal do projeto: o processo de fabrico *laser cladding*. Consiste num capítulo onde se procura abordar as variadas temáticas envolvidas neste método de fabrico como o seu conceito e funcionamento, aplicações, especificações do processo, parâmetros e os *outputs* envolvidos, os materiais utilizados, o crescimento desta indústria, as expectativas futuras e outros pontos de relevância.

O terceiro capítulo consiste na experimentação propriamente dita do presente projeto. É a secção da dissertação onde se apresenta todo o procedimento experimental, desde a escolha dos materiais, passando pelo fabrico de provetes com geometrias específicas para serem solicitados à fadiga. Primeiro expõe-se os materiais escolhidos em consonância com as necessidades e possibilidades da empresa; de seguida é descrito o método de obtenção dos provetes através do processo de maquinagem. Apresenta-se, ainda, uma abordagem

pormenorizada da máquina de *laser cladding* tocando em pontos como os seus constituintes, as suas regras de funcionamento, questões de segurança inerentes e algumas especificações, entre outros. Previamente às deposições e à definição dos parâmetros a serem usados nessas deposições, realizou-se um subcapítulo de grande importância, onde se analisa os testes feitos pela ERLAS[®], o fornecedor da máquina existente no grupo SERMEC. Esse subcapítulo permitirá estabelecer como referência muitos dos resultados obtidos aquando das deposições do presente estudo.

No quarto capítulo deste trabalho apresentam-se os resultados, assim como a sua discussão. Trata-se de um capítulo onde se introduz, inicialmente, um subcapítulo de grande importância, que analisa com maior pormenor os resultados e se retiram conclusões sobre os testes de deposição preliminares visando a definição dos parâmetros de deposição. Estes testes tiveram como principal foco perceber quais os parâmetros mais indicados para o fabrico dos provetes para os ensaios de fadiga. Neste subcapítulo especificam-se todos os detalhes inerentes ao processo de deposição correlacionando-os com o subcapítulo anterior. Finalmente, entra-se na área de estudo da fadiga, onde se apresenta a máquina usada, os ensaios realizados e as conclusões finais dos ensaios de fadiga e influência dos parâmetros do processo de *laser cladding*.

O último capítulo, o quinto capítulo, sumaria todas as conclusões extraídas desta dissertação, bem como são dadas sugestões de trabalhos e expectativas futuras na área e domínio do processo de fabrico *laser cladding*.

2. Revisão bibliográfica sobre *Laser cladding* e Fadiga

Este capítulo pretende contextualizar o leitor para o processo de fabrico estudado neste projeto: o *laser cladding*. Aqui serão abordadas características essenciais deste processo que fazem dele um processo cada vez mais interessante para o setor industrial, com referência às vantagens, limitações, aplicações e parâmetros do processo. A importância deste método é ainda mais importante nos tempos que correm, dado o grande interesse nas técnicas de fabrico aditivo. Com efeito, esta técnica pode ser considerada uma versão primitiva das técnicas de fabrico aditivo atuais.

2.1 Conceito e funcionamento

A performance de uma superfície de um componente pode ser melhorada com a aplicação de um revestimento sobre ela, através da utilização de ligas com boas propriedades mecânicas (e.g. dureza) e de resistência à corrosão. Tecnologias de revestimentos tradicionais como a deposição química em fase de vapor (*Chemical vapour deposition* – CVD), a deposição física de vapor (*Physical vapour deposition* – PVD), *spray* térmico e ainda soldadura por arco de sobreposição não permitem adquirir ligações ideais ou satisfatórias entre o material de revestimento e o material do substrato. A conexão entre revestimento e substrato é fraca nas técnicas de CVD e PVD, as porosidades são facilmente criadas no processo de *spray* térmico e torna-se difícil controlar a incidência de calor através da soldadura por arco, o que provoca distorções térmicas e altas diluições no componente final do material de adição (Ya 2015).

Em comparação, o processo de *laser cladding* ou revestimento por *laser* utiliza uma fonte de calor gerada pelo *laser* para depositar uma fina camada do material desejado num material base (substrato) que se move ou está imóvel, oferecendo propriedades bastante atrativas. Quando o material base está em movimento, o cabeçote de processamento está parado; no caso do substrato estar imóvel, o cabeçote de processamento movimenta-se (Toyserkani, Khajepour et al. 2005, Ya 2015).

Relativamente ao material depositado, este pode ser transferido para o substrato por vários métodos: injeção de pós, colocação prévia de pós sobre o substrato ou por alimentação por fio. Neste processo, o feixe *laser* funde as partículas dos pós no substrato e estas rapidamente solidificam quando a potência do laser é removida. Entre estes métodos, o *laser cladding* por injeção de pós tem vindo a demonstrar-se o mais eficiente, existindo uma grande variedade de materiais que podem ser depositados no material base para formar uma camada com uma espessura entre 0,05 a 2 milímetros e larguras tão estreitas como 0,4 milímetros. Dada essa eficiência, o método da injeção de pós será o abordado em todo o presente relatório, método este que é esquematizado na Figura 2 (Oberberg, Jones et al. , Toyserkani, Khajepour et al. 2005, Ya 2015).

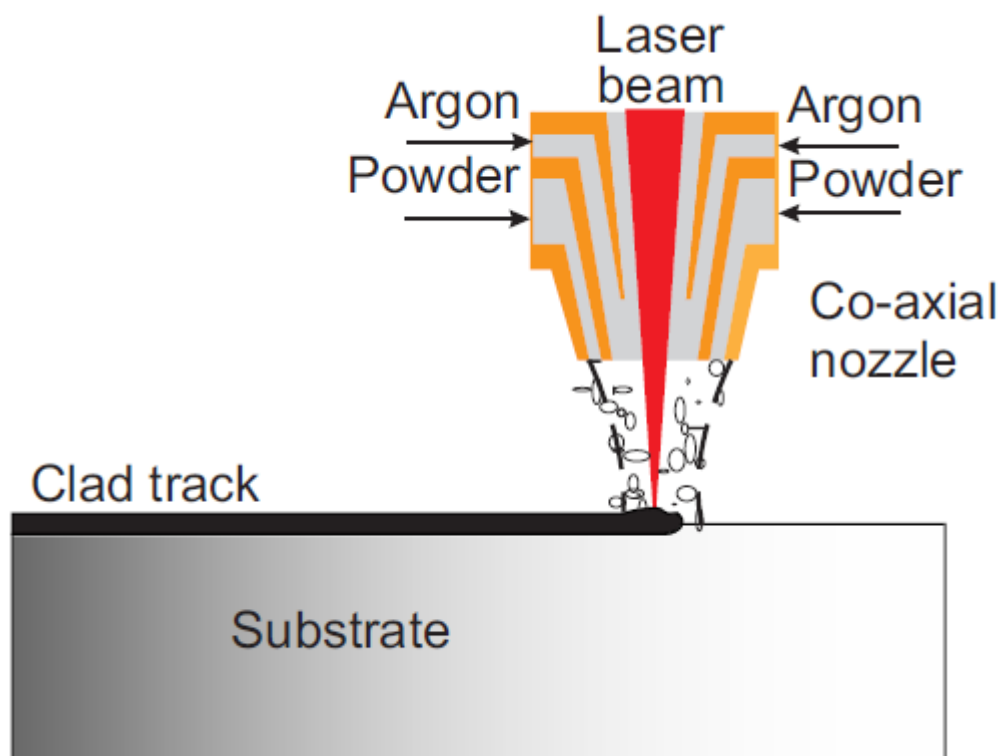


Figura 2 – Esquemática do processo de *laser cladding* por injeção de pó com bocal co-axial (Ya 2015).

Como já atrás referido, durante o processo de *laser cladding*, a superfície do substrato é fundida pela irradiação de calor do *laser* e é criada uma zona de fusão. Os pó podem ser injetados nessa zona de fusão através de 3 tipos de bocais (*nozzles*): um bocal coaxial, bocal cônico que está acoplado ao dispositivo do *laser* e permite a injeção de pó de uma maneira contínua e homogênea por todo o substrato; um bocal radial, que como o nome indica injeta pó radialmente ao substrato e não se encontra acoplado ao dispositivo *laser*; e ainda um bocal não axial ou lateral, quando a injeção de pó é feita à parte da fusão do laser e de forma lateral, tal como o bocal anterior, com a diferença de apenas ser injetada por um lado. Na Figura 3 podem ser visualizadas essas diferenças entre bocais usados em *laser cladding* por injeção de pó. Toda a injeção de pó é acompanhada e ajudada por um gás inerte, chamado gás transportador de pó. Durante a injeção é formado um fluxo de pó aquando da saída dos mesmos pelo bico do bocal, tornando os pó fundidos e capturados pela zona de fusão no material base (substrato) que ficam metalurgicamente ligados entre um e outro pela referida zona. Existe, depois, um outro gás, chamado gás de proteção, que é usado para proteger a zona de fusão principalmente contra a oxidação. Normalmente esse gás é o argon (Ar), contudo também pode ser o azoto (N) ou o hélio (He) (Soares 2014, Ya 2015).

Assim, o revestimento é produzido na superfície do substrato quando o feixe de *laser* e o fluxo de pó injetado “viajam” juntos pelo substrato. Na prática, a superfície é revestida pela deposição de vários cordões sobrepostos uns sobre ou ao lado dos outros, dando origem à camada de revestimento (Ya 2015).

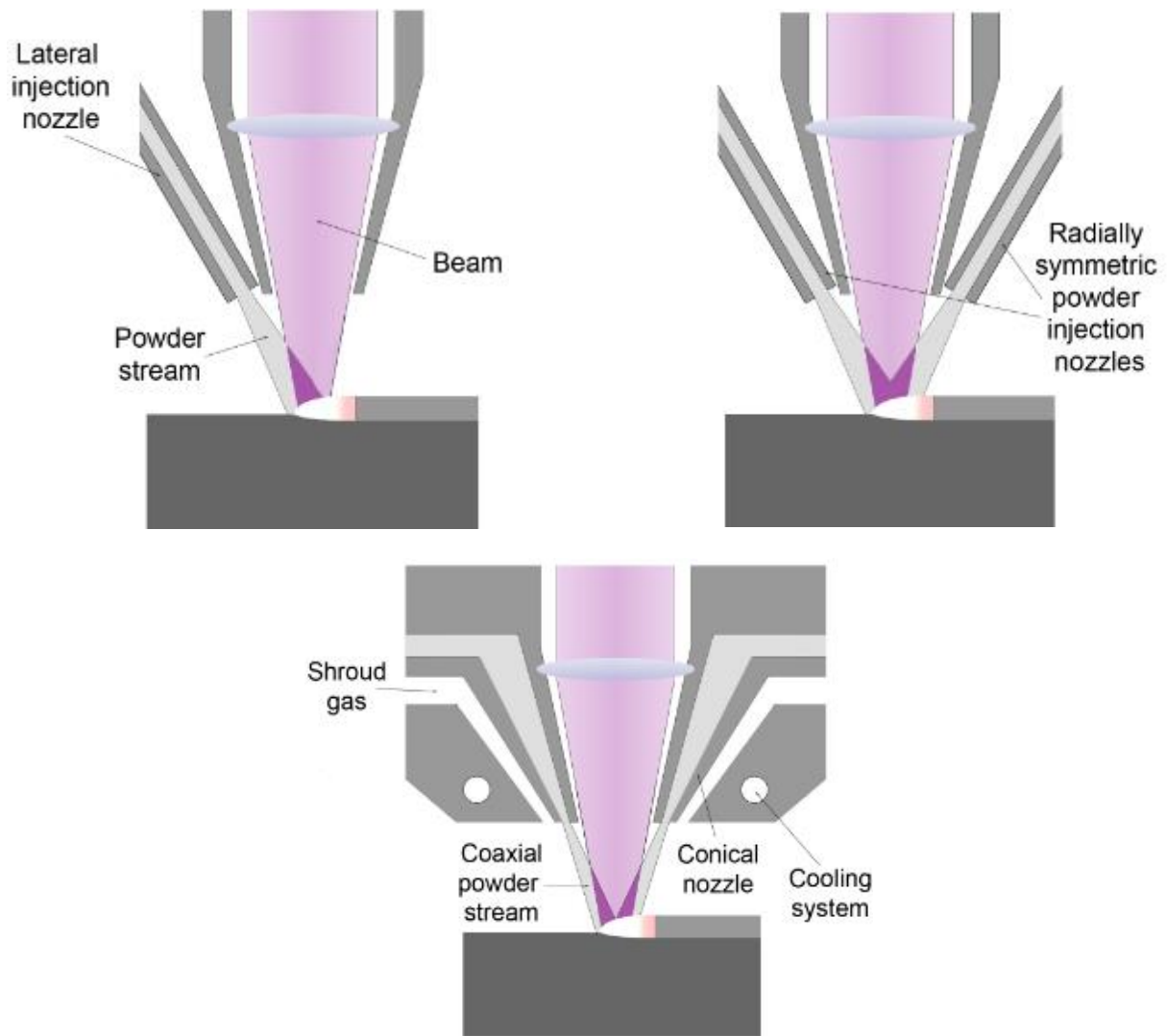


Figura 3 – Bocal não axial (em cima à esq.), bocal radial (em cima à dir.) e bocal coaxial (em baixo) (Wikiwand 2017).

Em adição às aplicações de revestimentos metálicos, o processo de *laser cladding* também constitui um processo de fabrico revolucionário, uma vez que, pode ser usado como técnica de prototipagem rápida. O processo resulta, então, numa camada de revestimento muito densa, homogênea, não porosa e com boas propriedades mecânicas, que é metalurgicamente ligado ao material substrato, em contraste com os métodos convencionais que criam naturalmente camadas de materiais mais porosas. Para além disso, a integração de uma tecnologia de *laser cladding* com um modelo sólido CAD de três dimensões, que é cortado em várias camadas, proporciona a capacidade para fabricar componentes complexos sem passos intermédios (Oberg, Jones et al. , Toyserkani, Khajepour et al. 2005).

O desenvolvimento da tecnologia *laser cladding* depende do aprimoramento/otimização das tecnologias auxiliares envolvidas. Perceber as interconexões entre essas tecnologias e a qualidade do processo é o maior passo para o crescimento do mesmo. No entanto, numerosas interações entre essas tecnologias envolvidas no *laser cladding* não só aumentam a complexidade do processo, como também aumentam o número de parâmetros do mesmo (Toyserkani, Khajepour et al. 2005).

2.2 Vantagens e limitações

O *laser cladding* oferece muitas vantagens em comparação com os processos convencionais de revestimento referidos anteriormente, tanto a nível de qualidade do produto obtido, como em termos de produção industrial (Toyserkani, Khajepour et al. 2005, Soares 2014). Contudo, como em todos os processos, existem algumas limitações ou aspetos a desenvolver. Neste subcapítulo abordar-se-á, então, as vantagens e as limitações gerais deste processo.

De um modo geral, esta técnica de processamento de materiais pode produzir um melhor revestimento com a mínima diluição, mínima distorção e uma melhor qualidade superficial, atingindo-se moderados índices de precisão dimensional e rugosidades superficiais mínimas na casa dos 10µm, ao mesmo tempo que se conseguem grandes alcances em termos de material depositado. Em termos de dimensões e geometrias dos cordões produzidos, como já mencionado anteriormente, é possível atingir espessuras mínimas na casa dos 0,05 mm e larguras mínimas de 0,4 mm, enquanto em termos de taxas de material depositado é possível atingir as 200g/min (Toyserkani, Khajepour et al. 2005, Soares 2014).

Relativamente à diluição falada em cima, esta é definida como o volume total da camada que contribui para a fusão no substrato. Ela aumenta com o aumento da potência do *laser*, mas diminui com o aumento da velocidade do processo ou com o aumento da largura do feixe transversal à direção do deslocamento. Uma diluição mínima controlada é considerada uma das principais vantagens técnicas do processo de *laser cladding*. Ensaios comparando a diluição provocada por *laser cladding* com outras técnicas de soldadura, em situações de atmosfera controlada, mostram que a diluição em *laser cladding* ronda valores de 2% e inferiores, comparando com os 5-15% para soldadura por *spray* plasma e os 20-25% para a soldadura com elétrodos (Oberg, Jones et al.). Em situações sem atmosferas controladas, a diluição neste processo deve-se manter entre 2-10% para obter produtos finais com excelentes características e propriedades mecânicas (Ya 2015).

De referir que este processo também é usado em fabrico aditivo para a construção de peças de raiz, no entanto este estudo foca-se, exclusivamente, no *laser cladding* como técnica de revestimento, reparação e manutenção. Assim, e dentro deste estudo, o *laser cladding* atrai cada vez mais desenvolvimentos científicos e industriais desde as últimas décadas, pois não só é possível economizar energia como materiais, tendo um papel significativo para a redução da poluição em comparação com os métodos convencionais (Ya 2015).

A aplicação deste processo ao setor industrial traz consigo consequências bastante favoráveis e interessantes. Em primeiro lugar, torna-se possível a criação de componentes de geometria bastante complexa, cumprindo os requisitos dos clientes, graças à produção diretamente ligada a um ficheiro CAD. Deste modo, não recorre a processos intermédios o que reduz o tempo de produção e, consequentemente, os custos associados. Em segundo lugar, torna-se possível a redução de excessos de produção e um exemplo bastante ilustrador trata-se da possibilidade de reciclagem dos pós, aquando do processo de *laser cladding* por injeção de pós e, assim, deste modo preocupações ambientais são eliminadas.

Outras duas vantagens deste processo de extrema importante e interesse consistem no facto de ser possível a adição de mais do que um material durante a fase de deposição da

matéria-prima, sendo então exequível a criação de componentes com camadas de diferentes materiais. A segunda vantagem trata-se da aplicabilidade do processo, isto é, dado o modo de funcionamento e a possibilidade de juntar o processo a sistemas robotizados de múltiplos eixos, torna-se possível atingir zonas de difícil acesso e, assim, atuar na reparação de componentes já existentes, que apresentam formas e geometrias complexas, de uma forma bastante mais eficiente (Soares 2014).

No entanto, apesar dos seus benefícios, o *laser cladding* não é ainda amplamente utilizado em revestimento metálico ou aplicações de fabrico aditivo. Enquanto o *laser cladding* oferece, claramente, um número de vantagens acima das tecnologias de fabrico convencionais, o processo tem também algumas limitações.

Devido aos distúrbios do processo, a qualidade do revestimento pode variar significativamente. Variações na qualidade podem mesmo ser observadas entre ciclos usando as mesmas condições de operação. Esta pobre reprodutibilidade surge da alta sensibilidade do processo a pequenas alterações nos parâmetros operacionais, como a potência do *laser*, a velocidade do feixe *laser* e a taxa de deposição dos pós, assim como as perturbações do processo como as variações na absorvidade. Encontrando experimentalmente um conjunto ótimo de parâmetros e usando-os num processo de *laser cladding* em malha aberta pode não resultar numa boa qualidade de revestimento devido aos distúrbios aleatórios e periódicos no sistema. Assim, desenvolvimentos de um sistema inteligente de controlo em malha fechada é essencial para ultrapassar os inúmeros erros furtivos deste processo tecnológico (Toyserkani, Khajepour et al. 2005).

Adicionalmente, e vários autores referem que a ausência de um sistema inteligente é a maior limitação deste processo, de elevado custo de investimento inicial. Por ser um processo de fabrico ainda em desenvolvimento, os custos relativos à aquisição do equipamento são, ainda, bastante elevados, chegando facilmente a valores na ordem do milhão de euro. Para além da limitação do uso desta tecnologia em revestimentos e processos de fabrico aditivo, existem também a baixa eficiência das fontes *laser* e a falta de controlo no processo. No entanto, com os contínuos desenvolvimentos tecnológicos em lasers de diodo de alta potência (HPDL), lasers de fibras e controladores sofisticados, o processo de *laser cladding* apresenta um ótimo potencial industrial para o uso de revestimentos metálicos e aplicações de fabrico aditivo (Toyserkani, Khajepour et al. 2005, Soares 2014).

Durante este subcapítulo abordou-se sumariamente algumas características que as máquinas de *laser cladding* apresentam. Contudo, posteriormente dedicar-se-á um subcapítulo à máquina usada durante esta dissertação, máquina essa propriedade da empresa em que este projeto foi realizado em parceria. Aí expor-se-ão todas as características e especificações da máquina em causa que permitiu, numa segunda fase do trabalho, realizar os ensaios de revestimento e deposição.

2.3 Materiais base e de deposição

Como já se viu, o *laser cladding* é usado para melhorar as propriedades das superfícies metálicas, especialmente de peças complexas ou de grandes dimensões. Para isso, uma larga variedade de pós metálicos e cerâmicos estão disponíveis para o efeito. Esses pós foram desenvolvidos para serem usados inicialmente em alguns processos de soldadura convencionais, contudo, esses pós podem e são também usados em revestimentos a *laser*, uma vez que a intenção de melhoramento das propriedades se mantém inalterada (Oberg, Jones et al., Schneider 1998).

Um aspeto fulcral neste processo é conseguir garantir uma forte ligação/conexão de fusão em toda a interface entre o material base e o material depositado. Portanto, é necessário um bom humedecimento entre cada um dos materiais. Dado o baixo humedecimento dos cerâmicos em relação aos metais, é muito difícil o revestimento de cerâmicos em superfícies metálicas. Em casos extremamente necessários, o uso de ligantes ou camadas *sandwich* podem dar uma ajuda, bem como o pré-aquecimento que pode aumentar o humedecimento, ainda que de forma pouco significativa.

Assim, o requisito básico para uma soldadura de fusão é que os dois materiais (base e depositado) sejam solúveis um no outro, surgindo um equilíbrio de fase entre eles. Para a maioria das ligas este requisito não apresenta dificuldades, mas os metais puros podem às vezes ser difíceis de revestir um no outro. O alumínio e o cobalto, por exemplo, não são solúveis um no outro, por isso não há nenhum equilíbrio de fase entre eles. O equilíbrio de fase existe apenas entre o alumínio e alguns intermetálicos e entre o cobalto e outro intermetálicos. Portanto, a única maneira de juntar o alumínio ao cobalto ou vice-versa é utilizar camadas *sandwich* com compostos intermetálicos.

A convecção é o principal mecanismo para a mistura do material adicionado com o material do substrato, sendo o grau de mistura e as taxas de arrefecimento dependentes dos parâmetros do processo. As propriedades dos materiais que influenciam esses mecanismos são, entre outros, o ponto de fusão e a condutividade térmica dos materiais. O ponto de fusão do substrato deve preferencialmente ser maior que o do material depositado. Se isto não se verificar, então há a possibilidade de durante a solidificação e o arrefecimento consequente da camada depositada, a região do substrato logo abaixo dela pode ser aquecida a uma temperatura acima do ponto de fusão. Por sua vez, essa região perderá resistência e sob o efeito de desgaste da camada acima, ocorrerá fissuração ao longo dessa região. Tal situação causará, em qualquer caso, porosidade ao longo da interface.

A formação de fendas na camada depositada é causada principalmente pela fadiga térmica criada pelo alto gradiente de temperaturas que existe durante a fase de arrefecimento e a diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos materiais. Especialmente camadas que são caracterizadas pela presença de partículas duras e frágeis, como os carbonetos, são propensos à iniciação de fendas. Camadas cerâmicas são também vulneráveis à criação de fendas, por causa da sua ductilidade limitada combinada com a grande diferença em coeficientes de expansão térmica, quando comparado com os metais.

Os diferentes materiais base podem ser divididos em dois grupos. O primeiro grupo contém todos os aços e o segundo grupo contém os materiais de base não-ferrosa, como o alumínio, o titânio e o níquel. Este último grupo é aquele onde se incluem todos os populares materiais de construção mecânica usados na indústria aeroespacial como na indústria automóvel, entre outras indústrias (Schneider 1998).

Relativamente aos materiais de deposição usados neste processo, há, sem dúvida, um grande número de materiais que têm vindo a ser estudados nos últimos 20/30 anos, contudo existem principalmente 3 tipos de materiais que têm revelado mais interesse e atenção. São eles os pós de ligas à base de cobalto (Co), os pós de ligas à base de níquel (Ni) e os pós de ligas à base de ferro (Fe). Os pós normalmente são produzidos com uma atomização de gás, permitindo que as partículas de pó fundido arrefeçam rapidamente e formem grãos de um tamanho muito pequeno. Estas ligas são geralmente caras e difíceis de processar por meios convencionais, mas oferecem propriedades muito superiores. Para além disso, vários carbonetos e pós cerâmicos, como WC, TiC, SiC, Al₂O₃, Cr₂O₃, BN, TiN, entre outros, podem ser adicionados às ligas acima mencionadas, melhorando as suas propriedades mecânicas, como a resistência ao desgaste e a resistência mecânica. Ainda adições de elementos como o cromo (Cr), vanádio (V), tungsténio (W), molibdénio (Mo), titânio (Ti) e carbono (C) melhoram a resistência da matriz dos materiais de revestimento, pois promovem a deformação da rede cristalina. Por fim, importante referir que estas ligas apresentam uma grande facilidade em serem revestidas em aços de baixa liga e aços de baixo carbono, muito mais baratos que os pós em cima referidos (Toyserkani, Khajepour et al. 2005, Ya 2015).

Uma vez que o principal objetivo do *laser cladding* é a criação de uma superfície com grande resistência mecânica e ao desgaste, é de realçar, ainda, que dentro dos diferentes tipos de materiais de deposição usados, não é uma surpresa o facto de se verificar cada vez mais uma investigação científica significativa em revestimentos por materiais compósitos (metais e cerâmicos) em substratos metálicos (Toyserkani, Khajepour et al. 2005). Contudo, não se irão abordar esses materiais de deposição, pois o principal foco desta secção é abordar os revestimentos metálicos usados com maior frequência em substratos metálicos, uma vez que serão esses os usados e estudados nos testes práticos da presente dissertação.

Surge agora, então, a necessidade de pormenorizar os 3 tipos de materiais de deposição mais utilizados, aqueles que têm levado um estudo mais intensivo e atento nos últimos anos.

O primeiro tipo de materiais de deposição utilizado são os pós à base de superligas de cobalto, ou normalmente chamadas de *Stellites*. Estes pós são muito populares no que diz respeito à melhoria da resistência ao desgaste de peças mecânicas, especialmente em ambientes hostis. Essas ligas são misturadas com outros elementos como cromo (Cr), níquel (Ni), tungsténio (W), molibdénio (Mo) e carbono (C). O cromo é adicionado para formar carbonetos e permitir melhorias em termos de resistência à corrosão e oxidação na matriz de cobalto. O níquel é adicionado para aumentar a ductilidade e reduzir a sensibilidade à criação de fendas. O grau atómico elevado do tungsténio e molibdénio podem deformar a rede cristalina da matriz de cobalto, permitindo aumentos de resistência da mesma. Com a adição de carbono, podem também formar-se carbonetos duros e frágeis, ajudando a bloquear as deformações da matriz. Como exemplo, os carbonetos predominantes formados e encontrados nos cordões de *Stellites* são normalmente ricos em cromo com durezas aproximadas de 2200

HV, o que confere aos cordões deste material durezas na casa dos 550 *HV*. Se, porventura, forem requeridas maiores durezas para uma certa aplicação, podem ser adicionados diretamente na liga de cobalto carbonetos, boretos e nitretos com alto ponto de fusão para aumentar a dureza e melhorar a resistência ao desgaste (Schneider 1998, Ya 2015).

O pó à base de superligas de cobalto mais usado é, de longe, a *Stellite 6*, que pode ser usado numa variada gama de peças como moldes, insertos, válvulas, parafusos alimentadores em máquinas de plástico e pás de turbinas. A temperatura de trabalho é limitada a 500 °C, contudo, este pó de deposição é maioritariamente selecionado para uso em *laser cladding* porque as suas propriedades e comportamento do revestimento são bem conhecidas e representam bons resultados em termos de proteção superficial (Schneider 1998). A Tabela 1 revela a composição química típica de uma *Stellite 6*, com discriminação de valores percentuais mássicos (%) (Soares 2014):

Tabela 1 – Composição química da *Stellite 6* (Soares 2014)

Cr	W	C	Fe	Ni	Mn	Si	Mo	Co
28 - 32	3,5 – 5,5	0,9 – 1,9	3	3	2	2	1,5	Restante

O segundo tipo de materiais de deposição mais comum são os pós à base de superligas de níquel. Estas ligas são misturadas com crómio (Cr), boro (B), carbono (C), silício (Si) e alumínio (Al) e, especialmente, os boretos duros e os carbonetos de silício são formados no revestimento para permitir uma melhor resistência à corrosão e ao desgaste. Contudo, uma presença demasiado elevada destas fases duras produz ligações frágeis entre o substrato e o revestimento. Para além disso, vários estudos indicam que adições de alumínio em ligas de níquel ajudam à formação de fases intermetálicas ou a camadas de óxidos que, consequentemente, aumentam a dureza da liga.

Importa ainda revelar que os pós à base de superligas de níquel são interessantes em aplicações onde as peças mecânicas estão expostas a atmosferas agressivas e a temperaturas elevadas. No entanto, a grande vantagem do uso de pós à base de superligas de níquel é que lhes permite competir com o uso de pós à base de superligas de cobalto é o facto desses últimos pós referidos serem relativamente raros e excessivamente caros, ao contrário dos pós à base de superligas de níquel que são amplamente disponíveis e muito mais baratos (Schneider 1998, Ya 2015). Para se ter uma ideia, o *Inconel 625* tem um preço aproximado de 20€/kg e os pós à base de superligas de cobalto rondam os 50€/kg.

Um exemplo de um pó à base de superligas de níquel é o *Inconel 718* e a sua composição química, discriminada por valores percentuais mássicos (%), pode ser visualizada na Tabela 2 (Soares 2014):

Tabela 2 – Composição química do *Inconel* 718 (Soares 2014)

Cr	Mo	Nb	Al	Ti	Ni
17 - 21	2,8 – 3,3	4,75 – 5,5	0,2 – 0,8	0,65 – 1,15	Restante

É importante referir que o pó à base de superligas de níquel mais popularmente conhecido e usado é o *Inconel* 625, contudo uma vez que se vai abordar e, efetivamente, usar esse pó no trabalho experimental, a descrição e especificação do mesmo é deixada para capítulos seguintes.

Por fim, o terceiro tipo de materiais de deposição são os pós à base de ligas de ferro e são os menos usados dos três até agora referidos. Tal como as outras duas ligas, estas também são misturadas com vários elementos, como crómio (Cr), molibdénio (Mo), carbono (C) e manganês (Mn), para aumentar a formação de carbonetos de modo a contribuir para melhorias das resistências à corrosão, oxidação e desgaste, proporcionando o fortalecimento da solução sólida.

Em suma, é de realçar que modificando de maneira eficiente e correta a composição química do material de revestimento, as propriedades mecânicas dos cordões/revestimentos daí resultantes podem ser bastante melhoradas, o que pode permitir ao material resistir a altos esforços e evitar criação de fendas durante o processo de *laser cladding* (Ya 2015).

2.4 Parâmetros do processo: *Inputs* e *Outputs*

Esta secção visa apresentar os parâmetros mais relevantes de análise num processo de *laser cladding*. Como se constou atrás, esta metodologia de fabrico apresenta elevada sensibilidade no que diz respeito às variações dos parâmetros, o que consequentemente cria variados e, por vezes, inesperados resultados nos cordões produzidos. Assim sendo, no presente subcapítulo pretende-se explicitar os parâmetros mais influentes deste processo, bem como a influência que cada um deles isoladamente ou conjuntamente, têm na qualidade e rendimento da técnica de fabrico.

Deste modo, é importante ter em consideração que os parâmetros podem ser divididos em duas categorias: os *inputs* e os *outputs* (Soares 2014). É comum encontrar na literatura uma outra categoria de parâmetros que se situam entre as outras duas categorias mencionadas. Trata-se do processo propriamente dito, ou o momento da deposição, ou ainda referido como o fenómeno físico. Essa categoria aborda pontos como a condução de calor, a absortividade, a rápida solidificação, as dinâmicas da zona de fusão, entre outros (Toyserkani, Khajepour et al. 2005). Contudo, essa categoria não vai ser tida como foco desta análise, pelo que se incidirá nas outras duas categorias.

Assim sendo, os *inputs*, ou parâmetros de operação, geralmente são divididos em 5 categorias: o *laser*, o movimento da máquina, a deposição de pós e também propriedades relacionadas com o material de deposição e o ambiente envolvente. Já os *outputs* do processo, que representam a qualidade do revestimento após a deposição, consistem na geometria obtida de cordões, na microestrutura dos mesmos, nas fendas existentes, na porosidade, na rugosidade superficial, na dureza obtida, nas tensões residuais e, muito importante, na diluição existente (Oberg, Jones et al. , Toyserkani, Khajepour et al. 2005). A Tabela 3 sintetiza e organiza a maioria dos parâmetros (*inputs* e *outputs*) associados ao processo de *laser cladding* pelas categorias já mencionadas. De notar que outras referências separam e organizam os parâmetros e variáveis envolventes do processo de maneira ligeiramente diferente, ainda assim, a referida tabela resume de uma maneira global os parâmetros mais relevantes deste processo.

Então, facilmente se conclui que os *outputs* do processo, ou seja, a qualidade dos revestimentos depende fortemente dos *inputs* do processo, isto é, dos parâmetros de operação. A maior parte das referências sobre *laser cladding* destacam sempre alguns parâmetros mais influentes neste processo, sendo eles a potência do *laser*, a velocidade do processo e a taxa de deposição de pós. Ainda assim, a taxa de gás transportador também se revela um parâmetro importante no resultado dos cordões produzidos (Ya 2015).

De seguida, apresentar-se-á uma descrição mais detalhada destes parâmetros, bem como qual a influência destes nos resultados do processo de fabrico.

Tabela 3 – *Inputs* e *outputs* do processo de *laser cladding* por injeção de pós (Schneider 1998, Toyserkani, Khajepour et al. 2005)

<i>Inputs</i>		<i>Outputs</i>
<i>Laser</i>	• Potência; • Perfil do feixe; • Focalização; • Comprimento de onda; • ...	• Geometria dos cordões; • Microestrutura do produto final; • Dureza dos cordões; • Fendas; • Porosidades; • Tensões residuais; • Rugosidade superficial; • Diluição; • Reprodutibilidade • ...
Movimento do aparelho	• Velocidade relativa; • Aceleração relativa; • Precisão do sistema.	
Deposição de pós	• Taxa de deposição de pós; • Taxa de fluxo do gás inerte; • Especificações dos bocais (<i>nozzles</i>); • ...	
Especificações dos materiais envolventes	• Geometria do material base; • Composição química do pó; • Propriedades dos materiais; • Tamanho do pó; • Tensões superficiais.	
Ambiente envolvente	• Pré-aquecimento; • Velocidade do gás de proteção; • Tipo do gás de proteção.	

2.4.1 Inputs do processo

De modo a evitar problemas no tratamento de diferentes materiais e poder otimizar o rendimento do processo, numa fase preliminar do mesmo existe a possibilidade de se realizar um pré-aquecimento aos materiais envolventes, tanto o substrato como o pó a ser depositado. Na generalidade dos casos, um pré-aquecimento em ambos os materiais envolventes permite melhorar os resultados e os rendimentos do processo. Relativamente ao material base, as vantagens passam por promover uma maior adesão das partículas de pó na fase de deposição devido às melhorias na condução de calor geradas na superfície do material base, para além de aliviar as tensões residuais que podem causar fissuras e assim reduzir a vida útil do material. No caso das partículas de pó, as grandes vantagens estão relacionadas com a prevenção de eventuais bloqueios dos bocais (*nozzles*) durante a injeção dos mesmos, eliminando-se problemas de humidade entre as partículas, de modo a permitir uma deposição consistente e homogênea (Soares 2014). Contudo, para que de facto o pré-aquecimento tenha o efeito desejado é necessário que seja realizado de uma maneira uniforme no material que se quer pré-aquecer. Assim sendo, esse pré-aquecimento teria de ser realizado num forno em condições adequadas, de modo a que o processo seja o mais homogêneo possível e que não se ultrapasse o ponto de fusão dos materiais, para não se criarem danos ou efeitos indesejados nos mesmos, caso contrário, o pré-aquecimento pode não resultar nos objetivos pretendidos inicialmente.

No decorrer do presente capítulo abordar-se-á, essencialmente, os três parâmetros mais importantes deste processo e que, de certo modo, influenciam em maior escala os resultados obtidos. Fundamentalmente será feita uma referência à potência do *laser*, à velocidade do processo e à taxa de deposição dos pós.

Relativamente ao parâmetro da potência *laser*, é importante que este seja bem definido. A potência *laser* como fonte de calor é definida pelo diâmetro do próprio raio, o perfil do feixe, isto é, a distribuição da intensidade espacial do feixe, e a sua focalização. Portanto, a energia efetiva utilizada no processo é afetada pela potência do laser com alguma relevância, sendo diretamente proporcional a este parâmetro. Alguns estudos realizados com o material base AISI 316L provaram que a altura e a largura dos cordões depositados aumentavam com o aumento da distância de focalização, enquanto a profundidade da zona termicamente afetada (ZTA) e a diluição associada diminuía. A altura dos cordões, bem como a sua largura, a ZTA e a diluição aumentavam também com o aumento da potência *laser*. Noutros estudos foi observado, ainda, que a temperatura da zona de fusão do material aumentava com o aumento da potência *laser* (Ya 2015).

Para além disso, existe à partida uma relação óbvia a reter na potência do *laser*: com o aumento da mesma no processo, a temperatura do pó adicionado sofre também um incremento, razão pela qual empenamentos podem ocorrer em peças de baixa espessura e depositadas com potências mais elevadas. Outra questão importante consiste na aplicação de potências excessivas que podem provocar grande evaporação das partículas e, por sua vez, pode induzir em perdas elevadas de pó, causando como consequência final eficiências mais reduzidas na globalidade do processo. Em contrapartida, para potências inferiores, o material depositado pode não atingir o ponto de fusão e por esta razão pode não ser capturado e absorvido tão eficazmente pelo material base ou pelo material já depositado (Soares 2014).

Já a velocidade do processo tem uma influência preponderante na geometria do cordão produzido. Se se mantiver constante a potência *laser* e os restantes parâmetros, a energia efetiva imposta no material diminui com o aumento da velocidade do processo. Facilmente se compreende que o *laser* ao se deslocar mais rapidamente, não incide durante tanto tempo no mesmo material e menos densidade de energia é injetada na peça em comparação com velocidades de varrimento mais baixas. Ao mesmo tempo, a largura e a profundidade da zona de fusão do material base reduz proporcionalmente ao aumento dessa velocidade; já no revestimento propriamente dito consegue-se maiores alturas e menores larguras de cordão, nas mesmas condições.

Para além disso, também o aproveitamento de pós localmente reduz com o aumento da velocidade do processo e, por exemplo um aumento excessivo do fluxo de partículas de pó pode provocar um bloqueio do feixe *laser* na zona de fusão. Portanto, rapidamente se compreende que é bastante relevante a distribuição uniforme de pós para a obtenção do produto final e, ao mesmo tempo, o controlo dessa distribuição de pós revela-se um fator fulcral, de modo a produzir cordões homogêneos, constantes e estáveis (Soares 2014, Ya 2015).

Finalmente, a taxa de deposição de pós revela-se um parâmetro fundamental neste processo. Independentemente do bocal (*nozzle*) que esteja a ser usado (coaxial, lateral ou radial) intuitivamente se compreende que as partículas de pó e o feixe *laser* interagem antes de atingirem o material base. Assim sendo, essas partículas de pó são conduzidas através do feixe *laser* com a mesma temperatura inicial, apenas diferenciando da mesma quando essas partículas atingem a zona de fusão devido às diferenças nas trajetórias individuais das partículas e as suas velocidades. A zona termicamente afetada (ZTA) e a diluição diminuem com o aumento da taxa de deposição de pós devido à atenuação da potência do *laser* (Ya 2015).

Novas janelas do processo de *laser cladding* devem ser construídas baseadas na otimização dos parâmetros do processo, principalmente os parâmetros mais importantes e abordados no presente relatório. Alguns autores recomendam a otimização do processo aplicando métodos de análise estatística (e.g. ANOVA), que tem sido aplicado com sucesso noutros métodos de processamento de materiais a *laser* como o endurecimento superficial a *laser*, o corte a *laser*, entre outros. Existe uma falta de conhecimento na aplicação destes métodos para investigar as relações existentes entre as geometrias dos cordões produzidos e os parâmetros de revestimento, o que seria uma mais-valia para a otimização do *laser cladding* (Sun, Liu et al. 2014, Ya 2015).

2.4.2 Outputs do processo

Como falado anteriormente, os *outputs* do processo, isto é, a qualidade do revestimento tem um número grande de variáveis, onde muitas delas são facilmente interrelacionadas, uma vez que se influenciam mutuamente. Contudo, existem certamente alguns fatores mais preponderantes e que requerem uma atenção mais elevada. Uma dessas propriedades do revestimento de grande interesse de estudo é a diluição. Esta propriedade já foi abordada atrás, contudo, de seguida, apresenta-se a definição geométrica da propriedade:

$$Diluição = \frac{b}{h + b} \quad (1)$$

onde b é a espessura do material base que foi fundido durante o processo de revestimento (mm) e h é a altura do cordão produzido (mm). É demonstrado um exemplo (Figura 4) desse cálculo no exemplo em baixo apresentado.

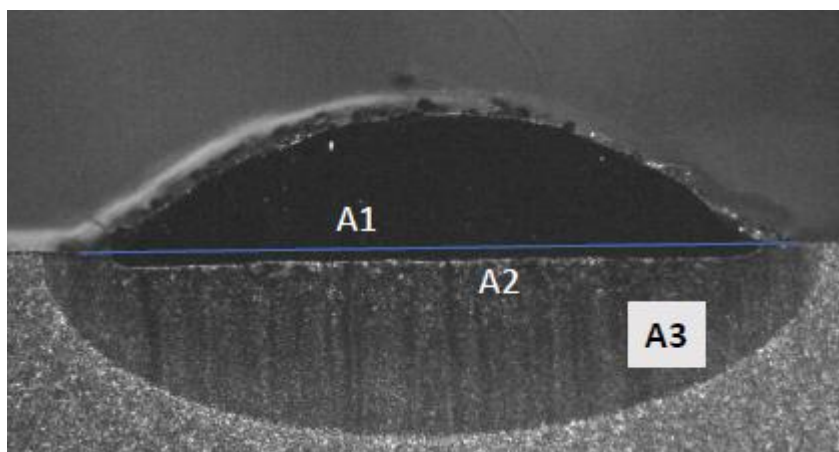


Figura 4 – Exemplo do cálculo da diluição.

Da Figura 4 resulta:

- $A1 \approx 1,403 \text{ mm}^2$;
- $A2 \approx 0,190 \text{ mm}^2$;
- $A3 \text{ (ZTA)} \approx 2,703 \text{ mm}^2$.

Assim, a diluição obtém-se como o quociente entre $A2$ e a soma de $A1$ com $A2$, resultando num valor percentual de 12%, no caso exemplificado (Toyserkani, Khajepour et al. 2005).

Como facilmente se compreende, o *laser cladding* requer a obtenção de uma forte ligação de fusão entre o material de deposição e o material do substrato que, por sua vez, requer a formação de uma zona de fusão no substrato. É de se notar também que a profundidade dessa zona de fusão deve ser o mais pequena possível, de modo a que se obtenha uma camada superficial pura que não seja diluída pelo material base. Esta característica, também conhecida como diluição da camada de revestimento produzida, é usada para caracterizar a qualidade do cordão ou cordões produzidos.

Relativamente a outro *output* do processo que influencia significativamente a qualidade do revestimento, aborda-se agora a presença de vazios ou poros na camada de revestimento, que é comumente referida como porosidade. A porosidade pode ser causada por várias razões. Primeiro, este fenómeno pode ser o resultado da formação de bolhas de gás que ficaram presas na zona de fusão da solidificação. Esta situação pode ser reduzida com a vibração da zona de trabalho, uma vez que foi observado por alguns investigadores que o uso de *laser cladding* vibratório não só reduz a porosidade do revestimento produzido, como também reduz as tensões residuais internas e a criação de fendas. Em segundo lugar, se a solidificação se proceder em diferentes direções, algumas regiões da zona de fusão podem ser fechadas. A contração ocorre após a solidificação dessas regiões fechadas e essa mesma contração causa tensões residuais na camada revestida e, ainda, pode levar à formação de buracos ou poros.

Existem, ainda, outros tipos de porosidades que são exclusivamente confinadas à interface do material de substrato e o material de deposição. Uma delas é causada pela presença de pequenas falhas, como por exemplo a existência de alguma sujidade ou até alguma gordura existente num dos materiais de trabalho, que influencia a tensão superficial e, com isso, a ligação de revestimento entre o pó depositado e o material base. Um outro tipo de porosidade chama-se “*inter-run porosity*” (Figura 35) e significa a existência de porosidades entre os diferentes cordões que formam uma camada de vários cordões. Esta porosidade aparece quando se depositam cordões próximos uns dos outros, originando camadas de revestimento. Contudo, é frequente acontecer este tipo de porosidades quando demasiado pó é depositado. Este fenómeno pode ser evitado com a mudança no rácio largura/altura para um rácio maior do que 5 (Schneider 1998).

Assim, a porosidade revela-se uma propriedade importante de análise, pois influencia com grande relevância outras propriedades como criação de fendas, criação de tensões residuais, isto é, uma grande parte das características que determinam a qualidade do cordão.

De um modo geral, para definir os limites a partir dos quais é possível produzir um revestimento sem problemas de diluição e porosidade (que por si só influenciam outros tantos parâmetros), a Figura 5, ilustra as regiões admissíveis e inadmissíveis de trabalho, de modo a obter revestimentos mais próximos da perfeição e mais próximos dos desejados. Na Figura 5 é importante ter em atenção que P/D (W/m) é a densidade energética do *laser* e M (g/s) é a taxa de pó depositado.

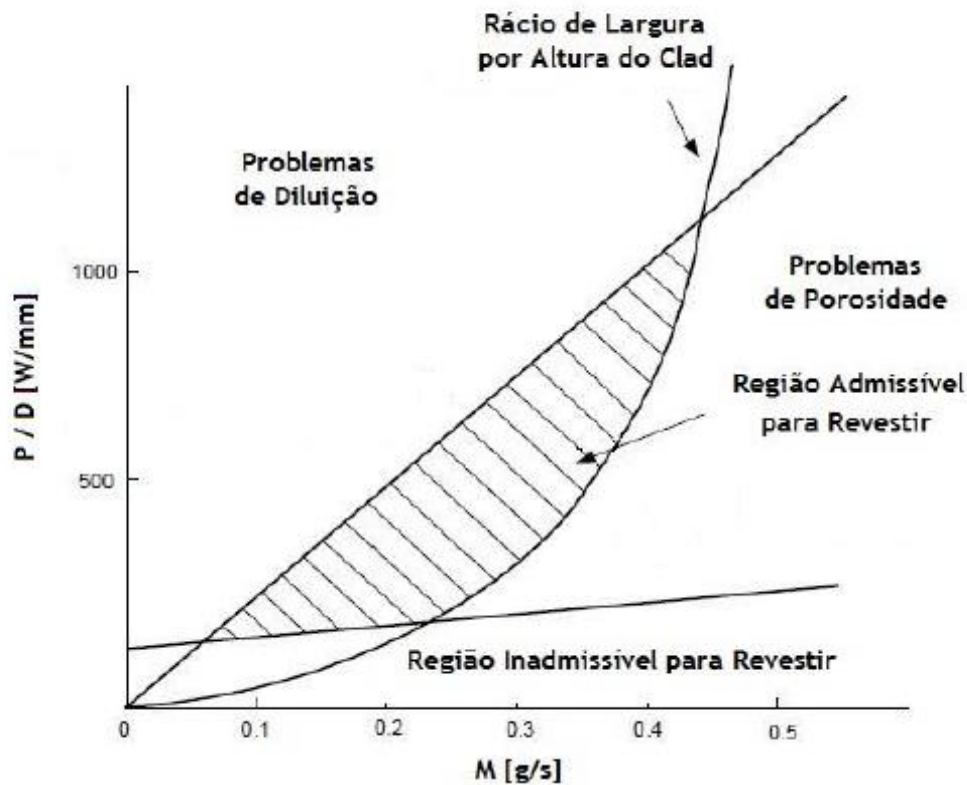


Figura 5 – Regiões admissíveis e inadmissíveis de trabalho em processos de *laser cladding* (Soares 2014).

Mais à frente no presente trabalho, focar-se-á a atenção na descrição mais detalhada de certas propriedades e parâmetros (*inputs* e *outputs*) do processo que serão revelantes consoante os testes práticos de deposição realizados para o projeto em causa.

2.5 Aplicações e oportunidades de mercado

Como falado anteriormente, o *laser cladding* tem diversas aplicações. Dado o foco deste trabalho, de seguida apenas se explicarão aquelas aplicações referentes ao processo de *laser cladding* como revestimento ou reparação/remodelação de peças.

2.5.1 Revestimento

O revestimento resulta da deposição de uma camada fina de material (por exemplo metais e cerâmicos) na superfície do material/substrato base selecionado. Este processo muda as propriedades da superfície do substrato para aquelas do material depositado. O substrato torna-se um material compósito exibindo propriedades que, geralmente, não atingiria isoladamente. O revestimento permite obter uma camada resistente à corrosão mantendo as suas características ao longo do tempo, e o material base permite uma boa capacidade de carga. Um número diferente de tipos de metais, como ligas de cromo, titânio, níquel e cobre podem ser usados no processo de revestimento metálico, como já referido anteriormente.

Existem várias técnicas de deposição de revestimento possíveis. No entanto, seleccionar a melhor depende de muitos parâmetros como visto atrás, entre eles o tamanho e a metalurgia do substrato, a adaptabilidade do material do revestimento para a técnica pretendida, o nível de adesão requerido e a disponibilidade e custo do equipamento, entre outros.

Apesar do *laser cladding* ter um potencial de utilização em diferentes indústrias para revestimentos metálicos, a sua aplicação nesses revestimentos é limitada devido ao alto custo e à baixa velocidade do processo. Contudo, com melhorias na eficiência do *laser*, redução dos custos desses equipamentos, há a um forte potencial para o *laser cladding* ser amplamente usado para aplicações de revestimento num maior número de indústrias. Outra indicação do potencial desta tecnologia, para revestimentos de uma variedade de materiais, é o aumento, nos últimos anos, do número de artigos publicados e relatórios que dizem respeito a esta tecnologia.

A maioria dos trabalhos publicados sobre revestimento metálico por *laser cladding* abordam o uso de vários materiais nas indústrias aeroespacial, médica e automóvel. Ligas à base de titânio, superligas à base de níquel e ligas à base de cobalto são algumas das importantes ligas que são depositadas nos diferentes substratos, como aços não ligados, aços ligados, aços cementados, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, ferros fundidos e ligas à base de níquel ou cobalto.

Recentemente, os revestimentos bio cerâmicos em ligas de titânio têm sido usados por *laser cladding*; as partes revestidas são, então, usadas em implantes ortopédicos com uma camada de fosfato de cálcio de modo a promover o crescimento do osso quando o implante for inserido no corpo. Este processo, juntamente com outros métodos de tratamento superficial por laser, tem sido também examinado para a produção de camadas metálicas vítreas, que proporcionam uma resistência superior contra o desgaste e a corrosão.

O mercado líder de revestimentos metálicos por *laser cladding* é o do revestimento de turbinas de gás de *aircrafts* comerciais. Em resposta à procura para o desenvolvimento de maiores eficiências, menores custos dos motores industriais das turbinas de gás, alta resistência, materiais capazes de trabalhar a altas temperaturas, como as superligas à base de níquel, são revestidos os corpos das turbinas para encontrar as necessidades dos componentes dos caminhos de gás que sofrem com o calor. O *laser cladding* tem sido usado recentemente neste setor aeroespacial para depositar os mencionados materiais nos componentes dos *spacecrafts*. Com recentes melhorias tecnológicas na nova geração de *lasers*, é expectável que este processo tenha uma importante melhoria neste mercado de trabalho.

Em adição, o *laser cladding* tem também outras aplicações de revestimento para partes da indústria para produzir superfícies, que são resistentes à abrasão, à erosão e ao desgaste por adesão; corrosão húmida e oxidação e corrosão a altas temperaturas. Alguns dos produtos que receberam revestimento metálico por *laser cladding* são:

- Veios usados em ferramentas de perfuração;
- Sedes de válvulas de motor;
- Ferramentas para revestimento;
- Componentes de bombas hidráulicas;
- Moldes (Toyserkani, Khajepour et al. 2005).

Alguns exemplos observados na *SERMEC Group* têm a ver com reparações de órgãos mecânicos que sofreram avarias e através do *laser cladding* pretende-se reparar o material danificado (ver Figura 6):

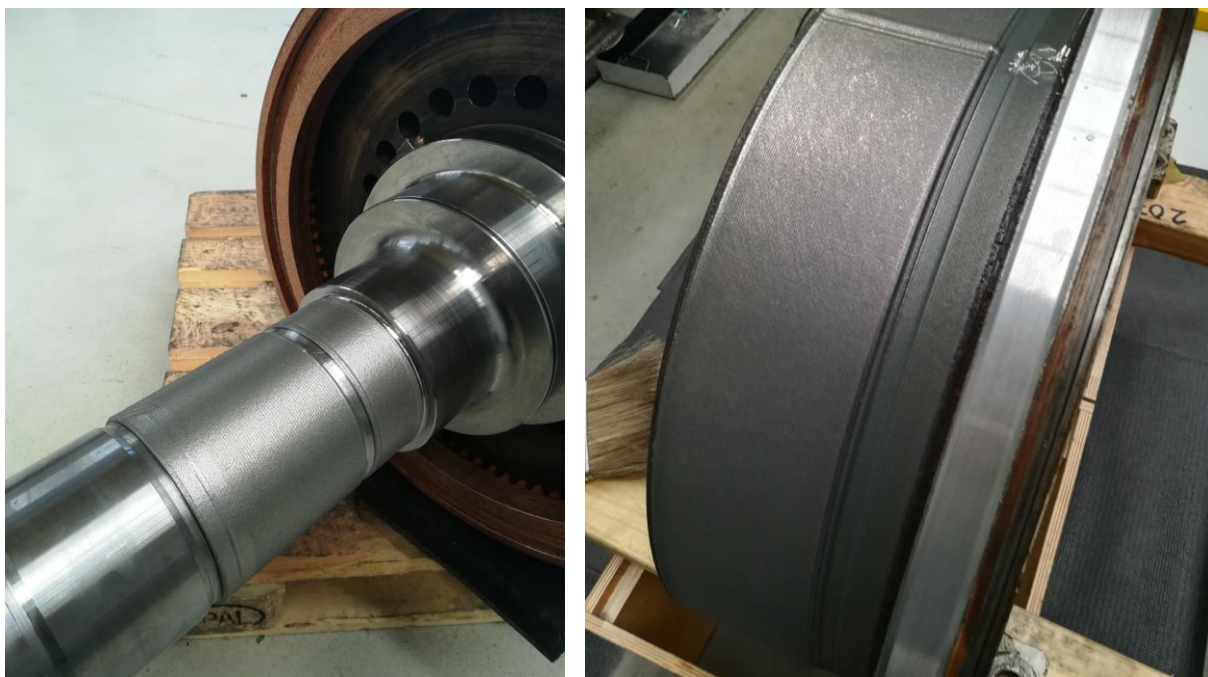


Figura 6 – Revestimentos de peças na *SERMEC Group*.

2.5.2 Reparação e remodelação de peças

A maior aplicação da tecnologia *laser cladding* é na reparação e remodelação de componentes de alto valor como ferramentas, pás de turbinas e componentes militares. Este processo pode ser usado na recuperação dos componentes de alto valor que sofreram avarias devido a erros de *design* ou devido a ações acidentais não previstas. A técnica também pode ser usada para corrigir erros de fabrico (ex: maquinagem) que de outro modo poderiam comprometer toda a produção da peça.

Métodos convencionais usam a soldadura para recuperar esses componentes danificados; no entanto, esses métodos são frequentemente danosos devido às temperaturas altas distribuídas acima da área de reparação. Esta destruição térmica causa uma baixa qualidade mecânica, fendas, porosidades e uma vida muito curta ao componente. O *laser cladding* consegue proporcionar uma reparação estrutural permanente e uma remodelação em muitas ligas (como por exemplo ligas de alumínio) que são geralmente consideradas ligas de muito má soldabilidade por processos convencionais. O sucesso da tecnologia *laser cladding*, nesta área, é devido à pequena zona aquecida, à rápida solidificação, à baixa diluição, ao aumento da limpeza do processo e ao aumento do controlo sob a profundidade da zona termicamente afetada.

Uma outra área, em que o *laser cladding* exerce um importante papel é na reparação de pás de turbinas e na sua remodelação. Pás de turbinas estão sob esforços mecânicos e térmicos muito altos (por exemplo, forças centrífugas e gradientes térmicos) num ambiente agressivo. Essas pás, frequentemente, sofrem uma variedade de danos durante a operação, como fluência, fadiga, corrosão a quente, impacto de partículas externas nas suas superfícies, etc. Portanto, em termos de requisitos de manutenção, dificuldades de manufatura e custos, as pás são o item mais crítico na atualidade das turbinas de gás. Como resultado, os fabricantes das pás e empresas de manutenção estão a procurar tecnologias de reparação que não só reparem os defeitos das pás, mas também mantenham as características mecânicas e metalúrgicas originais dos componentes reparados.

Nesta tecnologia de *laser cladding* transfere-se calor só para áreas localizadas dependentes do diâmetro do feixe de laser. Como resultado, os *inputs* de calor (entregas térmicas) são no mínimo uma ordem de grandeza mais baixos que os *inputs* de calor dos processos de soldadura convencionais, resultando em tensões residuais e distorções mais reduzidas e uma zona termicamente afetada substancialmente mais pequena.

Existe um potencial mercado de reparação recorrendo ao *laser cladding* em particular nos motores de turbina. No fabrico e reparação desses motores, o *laser cladding* está a ser rapidamente reconhecido como uma tecnologia essencial e crítica. Em alguns casos, é até reconhecida como a única tecnologia de reparação.

O mercado de reparação e remodelação tem uma amplitude enorme. No entanto, parece não existir valores concretos para definir o tamanho deste mercado. Um dos aspetos-chaves deste mercado é, sem dúvida, a manutenção de componentes de motores na área aeroespacial e aeronáutica. A manutenção de motores de aeronaves representa cerca de 30% do custo total de manutenção da aeronave, sendo um bom indicador do tamanho deste mercado. O mercado global de reparação de motores de turbinas e pás de compressores, usado

em aplicações civis e militares, tem sido estimado em cerca de 1,2 mil milhões de dólares por ano (Toyserkani, Khajepour et al. 2005).

De seguida, na Figura 7, pode-se observar um exemplo específico de uma aplicação de reparação de um *main shaft*. Este exemplo foi retirado de um caso concreto que a empresa *SERMEC Group* se depara semanalmente, e trata-se de um *main shaft* que foi acidentalmente perfurado durante um processo de maquinagem, na qual a ferramenta removeu demasiado material e, por conseguinte, foi necessária a sua reparação, como se vê na imagem que se segue.



Figura 7 – Reparação de um *main shaft* na *SERMEC Group*.

2.6 Crescimento da indústria e expectativas futuras

A tecnologia de *laser cladding* está nos estágios iniciais de comercialização e oferecerá uma revolucionária e nova técnica de fabrico para a indústria do novo milénio. Devido às suas características promissoras, muitas indústrias mantem os olhos nesta tecnologia do futuro.

Grupos de investigadores e empresas envolvidas no desenvolvimento desta tecnologia devem canalizar os seus esforços em variadas direcções para resolver as atuais limitações desta tecnologia. O principal foco dos esforços dos investigadores passa pelo desenvolvimento de máquinas automatizadas para o processo, que podem não só depositar numa variada enorme de ligas, mas também podem fabricar formas complexas sem a necessidade da presença de especialistas no funcionamento da máquina. O desenvolvimento de máquinas automatizadas pode não ser possível sem colaborações entre pesquisadores com diferentes conhecimentos técnicos. O desenvolvimento de um controlador para este tipo de máquinas necessita de cientistas especializados em controlo, automação e ainda em conceitos de metalurgia.

Adicionalmente, os esforços dos investigadores devem-se focar no aumento da velocidade do processo, uma vez que a velocidade média atual deste processo é considerada baixa comparando com técnicas competitivas como o *spray plasma* e o *spray térmico*. Também as aplicações do *laser cladding* na indústria aeronáutica e os efeitos do processo nos materiais base desta aplicação precisam de futuras pesquisas. A investigação deste método de fabrico e os efeitos nas suas aplicações requerem uma compreensão do processo e uma relação entre as propriedades do *laser*, a velocidade do processo, a taxa de deposição de pós e as propriedades mecânicas e metalúrgicas envolventes. Isto é, uma maior qualidade do produto, em termos de melhorias das propriedades de serviço, que pode ser obtida através de tolerâncias aprimoradas, controlo preciso dos parâmetros, seleção de novos materiais e redesenho do produto. Portanto, os esforços devem ser dedicados à modelação do processo (Toyserkani, Khajepour et al. 2005, Dr. Sc. Ing Torims 2013).

No mercado da reparação das pás das turbinas, os clientes estão à procura de máquinas que tenham a capacidade de reparar pás de turbinas no local, isto é, sem a necessidade de remoção da pá do rotor. Para fazer isto, é necessário desenvolver dispositivos de posicionamento sofisticados de modo a promover uma manobra suficiente e segura ao redor do rotor. A capacidade para revestir numa superfície inclinada é também algo essencial para a reparação de pás de turbinas no local (Toyserkani, Khajepour et al. 2005).

Nos últimos anos, a micro e nano tecnologias receberam uma atenção significativa. Os cientistas dizem que qualquer tecnologia pode ter aplicações na micro e nano escala, se poderem ser miniaturizadas da maneira certa. Tendo dito isto, o *laser cladding* tem um ótimo potencial para beneficiar desta tecnologia de ponta. Como uma tendência geral, é expectável que o equipamento do *laser cladding* e as suas aplicações comecem a tornar-se mais pequenas, baratas, mais facilmente manuseadas e flexíveis (Toyserkani, Khajepour et al. 2005, Dr. Sc. Ing Torims 2013).

Ainda, mas não menos importante, o desenvolvimento do mercado deve ser tido em consideração como uma questão muito importante para a exploração da tecnologia de todos os setores de produção. Um número elevado de indústrias ainda considera as tecnologias *laser* apenas ao alcance das melhores indústrias e empresas. Isto resulta numa grande barreira entre

especialistas de produção convencionais e especialistas de produção avançados. Esta barreira tem de ser quebrada através de um diálogo próximo entre estes dois grupos, juntamente com os consumidores finais. É importante esperar consumidores a requisitarem recursos apropriados e específicos para um processo particular; portanto, uma parceria entre esses dois grupos deve ser conduzida para satisfazer o consumidor final. Alguns autores acreditam que as grandes inovações no processo de *laser cladding* exigirão uma grande evolução das técnicas convencionais e avançadas, o que não será possível se não houver uma interação próxima entre os especialistas convencionais e os especialistas avançados de um lado, e o consumidor final do outro (Toyserkani, Khajepour et al. 2005).

Por fim, é importante ter em consideração que a educação de pessoas altamente qualificadas nesta área pode minimizar a lacuna tecnológica atual entre os setores de fabrico convencionais e avançados. Infelizmente, os atuais programas de processamento de materiais por *laser* nas universidades são muito limitados, a maioria devido à falta de *lasers* de alta potência; portanto, as oportunidades para a educação no domínio do *laser cladding* são muito limitadas. Adicionalmente, esta área de estudo é multidisciplinar e requer aprendizagens num variado número de diferentes campos, como o laser, as óticas, a automação, o controlo, a robótica e a ciência metalúrgica (Toyserkani, Khajepour et al. 2005, Parekh, Buddu et al. 2016).

2.7 Noções e conceitos sobre fadiga

Neste subcapítulo faz-se uma breve referência ao fenómeno da fadiga que será posteriormente analisado experimentalmente e que, juntamente com o processo de *laser cladding*, revela-se como um ponto principal de estudo da presente dissertação. Com efeito, os revestimentos metálicos por *laser cladding* envolvem frequentemente componentes mecânicos sujeitos a carregamentos cíclicos como é o caso dos veios, rodas dentadas, entre outros. Nestes casos é importante que o processo não resulte num agravamento acentuado da resistência à fadiga do componente sujeito ao processo de revestimento/deposição. Dada a diversidade de substratos, metais de adição e parâmetros do processo de deposição, é extremamente importante perceber o efeito da combinação destes elementos no comportamento à fadiga dos componentes.

O fenómeno da fadiga ocorre quando os materiais estão sujeitos a repetidas cargas cíclicas onde a magnitude dessa carga encontra-se bem abaixo da carga de fratura monotónica. Exemplos de equipamentos e componentes estruturais sujeitos a cargas de fadiga são, por exemplo, bombas, veículos, equipamentos de terraplanagem, plataformas de perfuração, aeronaves, pontes, navios, entre muitos outros. Assim, a fadiga é o processo de dano cumulativo no material que é causada pela existência de cargas variáveis repetidas. Dependendo do ambiente em que está inserido, esse fenómeno pode ser levemente ou severamente agravado. No caso de ambientes hostis e agressivos, este fenómeno é conhecido por fadiga sob corrosão.

Os danos de fadiga em componentes sujeitos a tensões cíclicas normalmente elásticas, ocorrem em regiões de maior concentração de tensões, onde as tensões localizadas podem exceder a tensão limite elástica do material. Após um certo número de flutuações locais, os danos acumulados causam a iniciação e conseqüentemente a propagação de uma fenda, ou fendas, nas regiões danificadas. Este processo pode causar na maioria dos casos a fratura ou rutura do componente. Quanto mais severa for a concentração de tensões, mais rápida será a iniciação da fenda de fadiga (Barsom and Rolfe).

Alguns autores definem a fadiga como o processo de progressiva mudança estrutural permanente e localizada que ocorre quando o material é sujeito a condições de tensões e deformações cíclicas num ou vários pontos. Este resultado pode culminar em fendas, como já referido, ou na completa rotura depois de sucessivas e repetidas flutuações (Campbell).

O número de ciclos necessários para se dar a formação de uma fenda de fadiga é designado por vida de iniciação de fenda, N_i . O número de ciclos necessários para propagar uma fenda de fadiga até um tamanho crítico é chamado de vida de propagação de uma fenda de fadiga, N_p . A vida total de fadiga, N_t , é o somatório dos dois conceitos apresentados e pode ser definido como se observa de seguida.

$$N_t = N_i + N_p \quad (2)$$

Importante referir que não existe qualquer fronteira clara entre a iniciação de fenda de fadiga e a propagação de fenda de fadiga. Além disso, caso exista *a priori* uma fenda num componente estrutural, a existência da mesma pode reduzir ou até eliminar a vida de iniciação da fenda de fadiga e, portanto, diminuir a vida total à fadiga do componente (Barsom and Rolfe).

Um exemplo simplificado da ação de fadiga e da forma de representação da informação experimental dos ensaios de fadiga está ilustrado na Figura 8. Inicialmente o componente é solicitado a partir da tensão zero para um valor máximo positivo e, depois, a carga começa a reverter, caindo de volta ao zero e seguindo para um valor máximo negativo, chegando finalmente de novo ao zero, dando-se por finalizado um ciclo (carregamento alternado). Depois de um número de ciclos, uma pequena fenda começa a iniciar-se e essa pode ser visualizada, frequentemente, como uma pequena ranhura ou arranhão sob ou perto da superfície em descontinuidade.

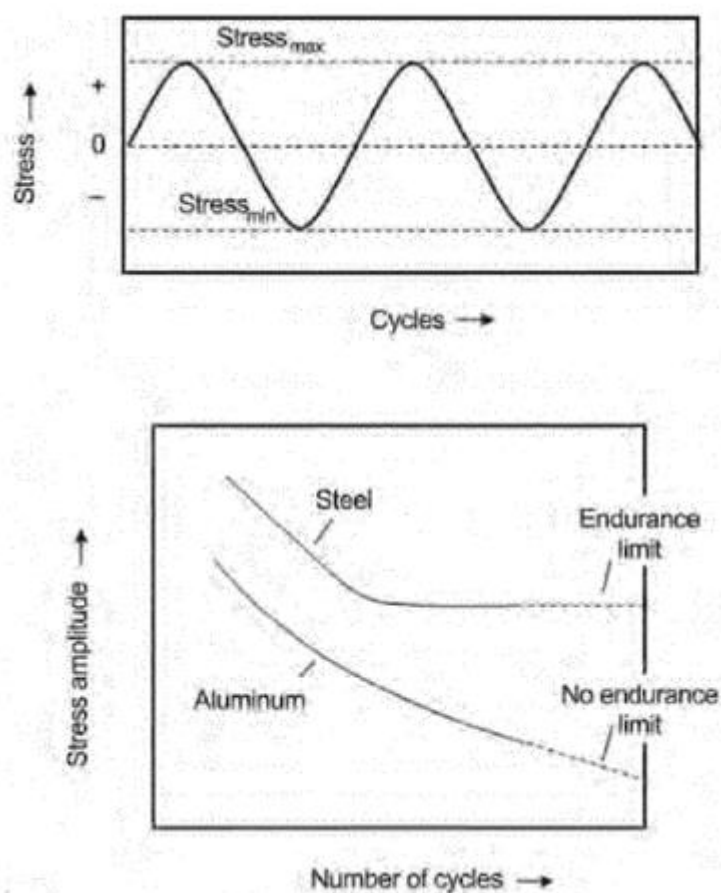


Figura 8 – Ciclo de fadiga (em cima) e um exemplo da vida de fadiga de dois materiais (em baixo) (Campbell).

Quantos mais ciclos forem aplicados mais irá propagar a fenda até finalmente se atingir numa porção de material não fissurado que não consegue resistir à carga, resultando na fratura do componente.

Na Figura 8 também se observa as vidas de fadiga de um aço normal e uma liga de alumínio na forma das chamadas curvas S-N. No caso do aço, se a tensão é baixa o suficiente para esse material, pode-se estar na presença de uma duração teoricamente infinita, o que significa que este material tem um limite de resistência à fadiga bem definido. Por outro lado,

no caso do alumínio não existe um limite de resistência à fadiga bem definido; se suficientes ciclos forem aplicados mesmo com cargas muito pequenas, o material eventualmente entrará em rotura por fadiga (Campbell).

As preocupações com os danos de fadiga foram reconhecidas na Europa no início do século XIX e, desde então, imensos estudos têm sido desenvolvidos. Contudo, a fadiga apenas foi incorporada como um critério de projeto muito perto do final do século XIX, ainda que os grandes desenvolvimentos tenham ocorrido desde os anos 50, fazendo com que, atualmente, a fadiga seja parte de especificações de projeto de milhões de estruturas e componentes de engenharia.

Ainda assim, é de realçar que variados parâmetros podem influenciar o desempenho à fadiga de um material. Esses parâmetros podem incluir parâmetros relacionados com a tensão ou carga, a geometria e as propriedades do componente, bem como o ambiente e a atmosfera externas envolventes. Relativamente aos parâmetros de tensão, estes podem ser divididos ainda em estado da tensão, intervalo de tensão imposto, razão de tensão, tensão variável ou constante, frequência e, ainda, a tensão máxima. No que diz respeito aos parâmetros de geometria e propriedades do componente, são aqui incluídos os elementos geométricos concentradores de tensões/extensões, o tamanho do componente, o gradiente de tensões, as propriedades mecânicas e metalúrgicas do material base e os seus possíveis revestimentos. Por fim, no que toca ao ambiente exterior e envolvente, são aqui incluídos parâmetros de temperatura e agressividade da atmosfera (Barsom and Rolfe).

2.8 Influência do processo de *laser cladding* no comportamento à fadiga

Como se viu em secções anteriores, os parâmetros do processo de laser cladding são, de facto, de uma quantidade elevada que quando atuados em simultâneo trazem consequências, por vezes, inesperadas para o produto final. Isto quer dizer que uma pequena mudança nos parâmetros pode, certamente, fazer variar a qualidade do revestimento final. Também a fadiga dos materiais base e materiais de deposição envolventes no processo é influenciada por esta variedade de parâmetros.

Chew, Pang et al. (2017) realizaram ensaios de fadiga em provetes revestidos por *laser cladding*. As amostras usadas foram divididas da seguinte maneira:

- Tipo I: Amostras para análises de fadiga de *laser cladding* testadas na condição de revestimento (Figura 9);
- Tipo II: Amostras que envolvem previamente a abertura de uma ranhura ou rebaixo. Posteriormente a ranhura é preenchida através da deposição de pós metálicos e, finalmente, a zona onde se deu o processo é retificada, de modo a possibilitar uma homogeneidade durante os ensaios de fadiga na zona revestida (Figura 10);
- Tipo III: Amostras preparadas com uma zona de revestimento maior que a anterior e com tratamentos de retificação pós-deposição apenas na área de avaliação à fadiga (Figura 11).

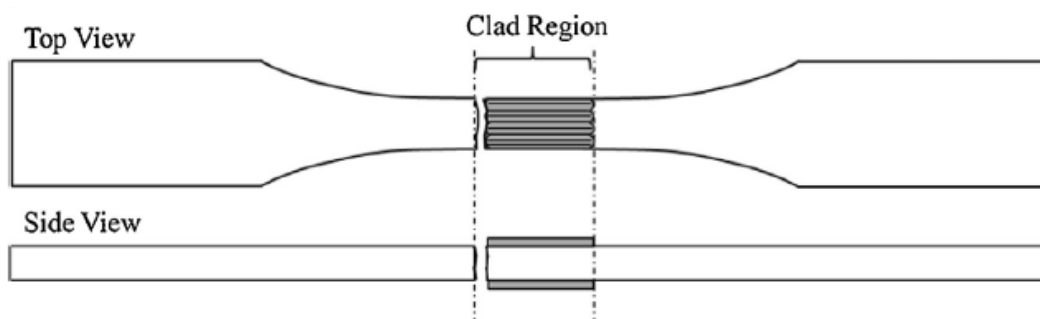


Figura 9 – Amostra Tipo I (Chew, Pang et al. 2017).

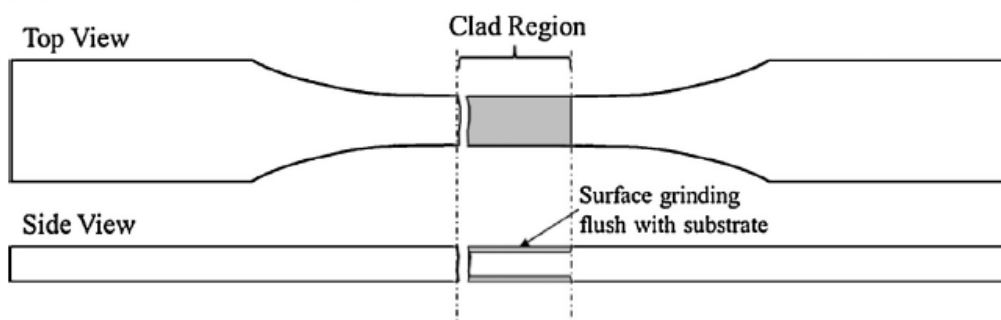


Figura 10 – Amostra Tipo II (Chew, Pang et al. 2017).

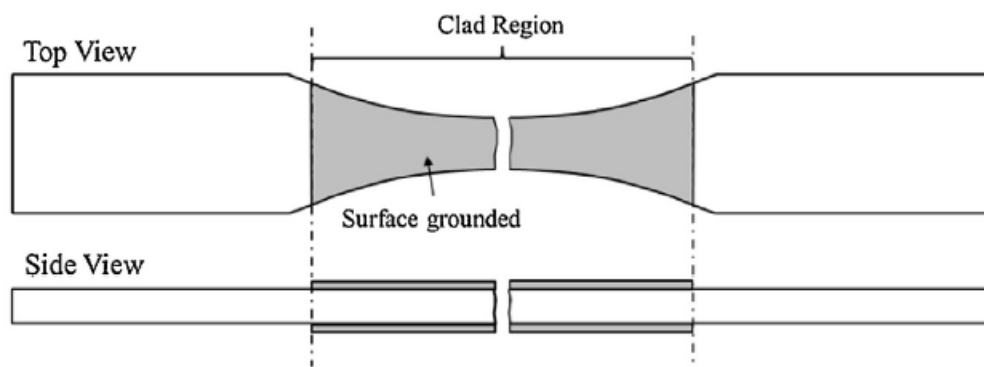


Figura 11 – Amostra Tipo III (Chew, Pang et al. 2017).

Foram ainda avaliadas performances à fadiga em amostras revestidas e não revestidas. As 3 diferentes amostras (Tipo I, II e III) foram testadas à fadiga usando um equipamento *Shimadzu EHF-E series Servopulser* com uma célula de carga de capacidade 50 kN. O teste foi feito em controlo de carga com razão de tensão $R=0$, com frequência de carregamento de 15Hz. A tensão nominal aplicada foi calculada usando a espessura inicial da amostra do metal base antes do processo de *laser cladding*.

Foi feito, como se referiu, ensaios à fadiga de amostras não revestidas. O teste de fadiga da amostra de metal base serviu, então, de referência tendo-se gerado uma curva S-N para comparação com as amostras de *laser cladding* testadas à fadiga. Assim, 9 amostras foram testadas à fadiga que começaram nos 750 MPa e desceram até 625 MPa. Para uma amostra sem revestimento, a fenda de fadiga iniciou-se a partir de um canto e propagou-se como uma fenda simples em forma de quarto de elipse antes da rotura por fadiga se tenha dado. Este comportamento de fadiga foi observado repetidamente em todas as amostras sem revestimentos devido à sua geometria plana.

Depois, 12 amostras do Tipo I foram testadas à fadiga que começaram nos 650 MPa e desceram até 300 MPa. Pode-se concluir que houve uma redução significativa na resistência à fadiga para a amostra de aço em condição de revestimento (Tipo I) em comparação com a amostra do metal base. Essas diferenças são observáveis nas curvas S-N que se apresentam no final da explicação dos resultados das 3 amostras. Para além disso, a redução da resistência à fadiga para as amostras de Tipo I comparada com a amostra de metal base é relativamente constante ao longo da região de teste. A resistência à fadiga, definida como a tensão à qual a amostra cedeu depois um certo número específico de ciclos, é usada para comparar a performance de fadiga relativa das amostras revestidas. O rácio de resistência à fadiga a 50000 ciclos e 500000 ciclos corresponde a 0,65 e 0,48 respetivamente.

A redução da resistência à fadiga nas amostras de Tipo I foi causada por um número elevado de fendas de fadiga que se iniciaram e se propagaram a partir das regiões mais baixas/interiores do revestimento. Múltiplas fendas de fadiga foram observadas a iniciar a partir da superfície superior e inferior da região do metal base. As fendas de fadiga das amostras de Tipo I propagaram-se como fendas semi-elípticas que é também tipicamente

observado no crescimento de fendas de fadiga iniciadas na parte de baixo do revestimento em cordões de soldadura em materiais. A partir do número de marcas de fenda (*ratchet marks*) formadas quando duas fendas se juntam, foi concluído que 6 fendas de fadiga primárias se iniciaram a partir da parte superior da superfície do metal base, enquanto 5 fendas de fadiga primária se iniciaram a partir da parte inferior da superfície do metal base. A localização das fendas de fadiga primárias iniciadas também aparentaram estar espaçadas regularmente. Consequentemente, foi observado que as iniciações das fendas de fadiga podem ter sido influenciadas pelo número de vezes que o feixe de laser fez uma curva no final da região revestida. As partículas de revestimento depositadas durante as voltas do feixe de laser atuam como geradoras de tensões localizadas e a região inferior do revestimento causa fendas na superfície que se iniciam prontamente e propagam-se levando à fratura.

Os valores das curvas S-N para as amostras de Tipo I mostram uma perda significativa de resistência à fadiga quando comparados com as amostras de metal base testadas.

De seguida, 7 amostras do Tipo II foram testadas à fadiga começando-se nos 685 MPa e descendo até ao nível de tensão de 475 MPa. Os resultados dos testes mostram que com a ranhura maquinada na amostra e posterior enchimento com revestimento e retificação da mesma melhora-se significativamente o rácio de resistência à fadiga para 0,89 a 50000 ciclos e 0,76 a 500000 ciclos.

A fratura por fadiga em todas as amostras do Tipo II ocorre na região de interseção da ranhura e material de revestimento com o metal base. Foi observado que múltiplas fendas semielípticas se propagaram e se juntaram, tanto na parte superior como inferior da região do revestimento. Mais uma vez, a presença destas fendas resultou em fratura por fadiga prematura. As fendas múltiplas semielípticas também parecem espaçar-se regularmente como observado no fenómeno descrito para as amostras do Tipo I. As marcas de fenda (*ratchet marks*) foram menos perceptíveis devido à menor concentração de tensões uma vez que os grânulos do revestimento foram retificados para alinhar à superfície do material base. Ainda assim, mesmo que a superfície esteja retificada, a região inferior do revestimento ainda facilitou a iniciação das múltiplas fendas, mas essas fendas propagaram-se a um rácio mais baixo devido à menor concentração de tensões, resultado da maior resistência à fadiga comparado com as amostras do Tipo I.

Por fim, 9 amostras do Tipo III foram testadas à fadiga que começaram nos 750 MPa e desceram até 500 MPa. Há uma melhoria significativa na resistência à fadiga das amostras do Tipo III. O rácio da resistência de fadiga aumentou para 0,96 a 50000 ciclos e para 0,86 a 450000 ciclos. A camada de revestimento estendida nas amostras do Tipo III resultou num diferente modo de fratura por fadiga que é mais favorável para performances de fadiga comparado com as amostras de *laser cladding* do Tipo I e Tipo II.

Muitas fendas iniciaram-se com uma proximidade considerável da superfície dura e frágil da camada de revestimento e depois propagaram-se em direção à FFZ (*fast fracture zone*). Foram ainda revelados, através do exame SEM, em certas regiões numerosas pequenas fendas que se iniciaram ao longo da superfície da camada de revestimento. A fenda dominante neste tipo de amostras sob o carregamento cíclico de tensão com o limite de 625 MPa foi de uma fenda em forma de quarto de elipse. Adicionalmente à fenda em forma de quarto de elipse, as fendas múltiplas mencionadas propagaram-se e uniram-se formando um vértice de fenda. A presença destas múltiplas fendas na superfície da camada de revestimento resultou

numa resistência à fadiga reduzida comparada com a amostra de material não revestido, falhando na propagação de uma simples fenda em forma de quarto de elipse.

A Figura 12 resume todos os resultados obtidos em termos de curvas S-N e conclui exatamente o que se obteve com as amostras Tipo I, II, II e uma amostra de material base (Chew, Pang et al. 2017).

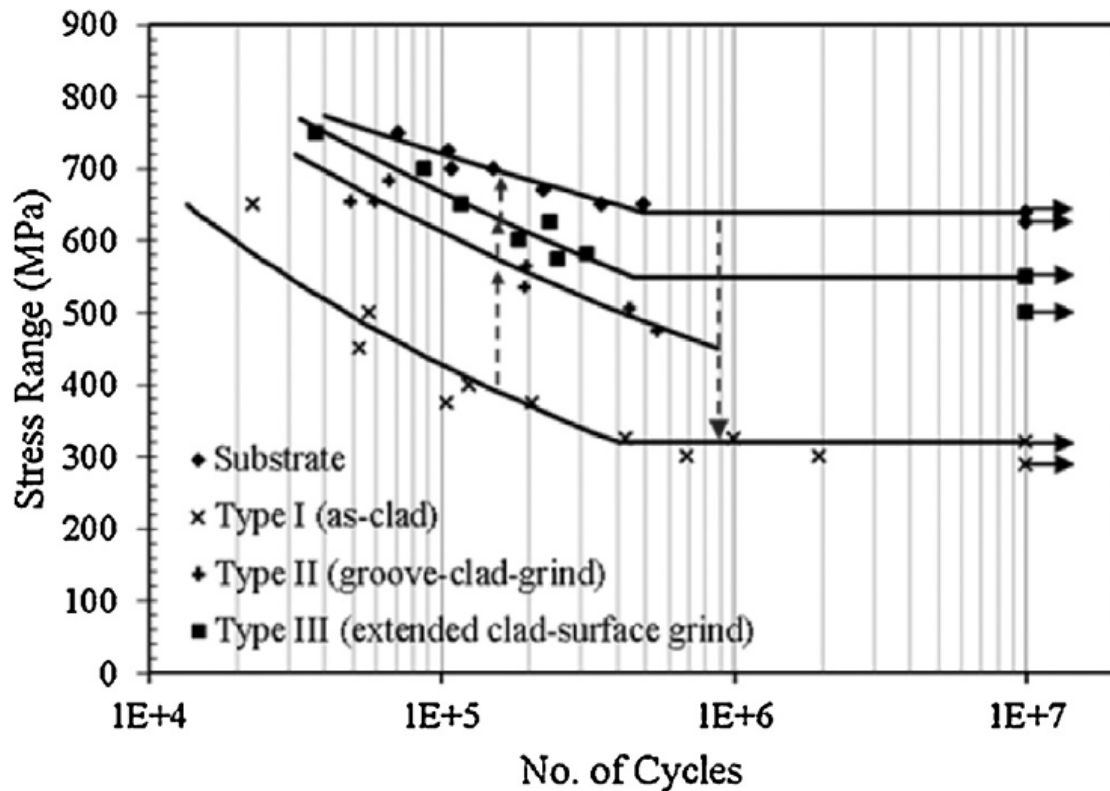


Figura 12 – Resumo dos resultados dos ensaios de fadiga realizados por Chew, Pang et al. (2017).

Já Sun, Liu et al. (2014) estudaram o comportamento à fadiga de um aço com alta resistência (AISI 4340) para avaliar o potencial da reparação por *laser cladding* em aplicações de aeronáutica estrutural. Também usaram provetes como no exemplo anterior de Chew, Pang et al. (2017) com alguns pequenos detalhes de diferenciação de geometria, de modo a testar o processo e averiguar conclusões. Relativamente aos pós de deposição usados foram usados dois tipos: um primeiro material igual ao material base, portanto um pó à base de AISI 4340; e um segundo pó denominado *AerMet 100*, um pó à base de ligas de aço martensítico de alta resistência e com percentagens elevadas de cobalto aproximadamente 13% (Sun, Liu et al. 2014, Corp. 2016). Algumas das conclusões retiradas deste estudo foram as seguintes:

- As propriedades mecânicas e a vida de fadiga do material de deposição AISI 4340 degradaram-se comparativamente ao material base. Essa degradação deve-se especialmente à elevada dureza e fragilidade do revestimento e da região da ZTA;

- A mudança do pó de deposição para o *AerMet* 100 melhorou tanto as propriedades mecânicas como a vida de fadiga, com aquelas produzidas pelo pó anteriormente mencionado (pó à base de AISI 4340);
- A existência de um tratamento térmico pós-deposições melhorou tanto as propriedades mecânicas como a vida de fadiga de ambos os materiais, comparativamente às amostras sem tratamentos pós-deposições (Sun, Liu et al. 2014)

Testes feitos em amostras de ligas de alumínio 7075-T651 por Zhuang, Liu et al. (2014) provaram que o uso de processos pós-deposição, mais especificamente “*deep surface rolling*” (DSR), trazem melhorias na vida de fadiga dos materiais. Primeiro, o DSR pode introduzir altas e profundas magnitudes de tensões residuais compressivas na interface entre o revestimento e o material do substrato. Em segundo lugar, os resultados dos testes de fadiga demonstraram que o DSR aumentava significativamente a vida à fadiga dos componentes testados, comparando com as amostras simplesmente revestidas e com as amostras que sofreram apenas um tratamento térmico após as deposições (Zhuang, Liu et al. 2014).

3. Técnicas e procedimentos experimentais

Nesta secção são apresentadas as técnicas e procedimentos experimentais que serviram de base ao presente estudo. Em particular são apresentados os materiais objeto de investigação assim como os detalhes dos ensaios realizados, e em concreto os ensaios de fadiga. Neste estudo foram selecionados dois materiais que foram identificados pela empresa como relevantes nas atividades industriais da mesma. Esses materiais são os seguintes:

- 18CrNiMo 7-6 – AISI 3415 - Aço de cementação (Aços 2017);
- GGG70 – Ferro Fundido Nodular.

Para além do interesse industrial deste estudo também existe um interesse académico, pois são escassos os estudos sobre o comportamento à fadiga destes materiais revestidos por *laser cladding*.

Os provetes de fadiga foram preparados com a forma paralelepipedica com as seguintes dimensões:

- Comprimento = $223 \pm 0,5$ mm;
- Largura = $25 \pm 0,1$ mm;
- Espessura = $4 \pm 0,1$ mm;
- Comprimento da ranhura = 100 mm;
- Largura da ranhura = $25 \pm 0,1$ mm;
- Profundidade da ranhura = 1 mm.

De referir que os provetes foram dotados de um rebaixo central com vista a permitir realizar uma deposição de material. As faces de 223×25 mm² foram retificadas de modo a apresentarem uma rugosidade de $0,4 \mu\text{m}$. No ANEXO A apresenta-se o desenho final dos provetes que foi enviado para maquinaria e que permitiu obter os provetes para os ensaios.

3.1 Materiais base

Nesta secção serão retratados de forma sucinta os dois materiais escolhidos que servirão como material base para as amostras dos ensaios de fadiga.

Em primeiro lugar, é importante referir que o primeiro material mencionado, 18CrNiMo 7-6 ou AISI 3415, é um aço de cementação ligado com cromo, níquel e molibdénio, geralmente fornecido no estado recozido com dureza de 229 HB. Na designação da Ramada Aços® o aço é conhecido como G15 Special. É um aço adequado para peças de grandes dimensões como engrenagens, árvores de torno, excêntricos, cambotas, entre outros e apresenta a seguinte composição química discriminada em valores percentuais mássicos (%) como se pode ver na Tabela 4 (Steel&Tube 2014, Aços 2017):

Tabela 4 – Composição química do aço de cementação (Aços 2017)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,15 – 0,21	0,4	0,5 – 0,9	0,025	0,035	1,5 – 1,8	0,25 – 0,35	1,4 – 1,7	Restante

Para além do mencionado, é um aço com características interessantes do ponto de vista superficial e de núcleo, uma vez que tratado termicamente, habilita o material de uma excelente resistência ao desgaste e resistência dado os seus 60 - 63 HRC de dureza superficial. E, para além disso, apresenta um núcleo duro com uma tensão de rotura no intervalo 800 – 1300 MPa, desde secções pequenas às relativamente grandes (Association 2008, Steel&Tube 2014, Aços 2017).

Este aço, como todos os aços cementados, são conseguidos com a cementação ou carbonização da superfície, seguidos de têmpera e revenido da parte outrora trabalhada (Association 2008).

De entre todas as suas propriedades mecânicas e físicas, existem algumas que são interessantes revelar como (Aços 2017):

- Densidade (ρ) = 7850 kg/m³;
- Módulo de elasticidade (E) = 210 GPa @ T = 20°C;
- Condutibilidade térmica = 38 W/mK @ T = 20°C;
- Coeficiente de dilatação térmica (10⁻⁶m/mK) = 11,1 @ T = 20 a 100°C;

A escolha deste material deve-se exclusivamente ao facto de ser um material comumente utilizado na SERMEC - *Wind Power*, dado a sua excelente aplicação em rodas dentadas e engrenagens. A empresa apresenta em stock este material, como se pode observar pela Figura 13 e, como tal, foi utilizado para o fabrico dos provetes necessários.



Figura 13 – Stock de 18 CrNiMo 7-6 existente na empresa.

O outro material utilizado trata-se de um ferro fundido nodular frequentemente denominado por GGG70. É um material que, por vezes, é designado também por ferro fundido dúctil; é um material altamente resistente à tração e à abrasão. Apresenta uma estrutura perlítica com propriedades mecânicas superiores ao GGG50 e GGG60 e, apesar da alta dureza, é facilmente maquinado e permite altos acabamentos superficiais (Foundry 2014, Dijkkmap 2015).

Segue-se a Tabela 5 e a Tabela 6 com a composição química deste ferro fundido discriminada em valores percentuais mássicos (%) e algumas das suas principais propriedades mecânicas:

Tabela 5 – Composição química do ferro fundido nodular GGG70 (Dijkkmap 2015)

C	Si	Mn	P	S	Fe
3,4 – 3,85	2,3 – 3,1	0,1 – 0,3	≤0,1	≤0,02	Restante

Nota: a composição química apresentada em cima não deve ser tomada como geral para todos os GGG70 pois consoante as necessidades mecânicas desejadas, as fundições dos mesmos podem sofrer alterações nesse sentido (Foundry 2014).

Tabela 6 – Principais propriedades mecânicas do GGG70 (Dijkkmap 2015)

Tensão de rotura	Tensão limite de elasticidade	Alongamento	Dureza
700 MPa	440 MPa	2 – 3 %	225 – 305 HB

Nota: à semelhança do explicado em cima, as propriedades mecânicas variam consoante a composição química do material.

Este material é adequado para muitas aplicações onde são necessárias altas resistências mecânicas e uma estrutura de base totalmente perlítica. Conciliando essas características à sua boa resistência à abrasão e tração, o GGG70 é usado frequentemente para a construção de prensas, rodas dentadas, árvores de cames, eixos principais de tornos e fresadoras, entre outros (Foundry 2014, Dijkkmap 2015) Na Figura 14 pode-se observar uma amostra de material que foi usado na empresa para obter os provetes pretendidos de ferro fundido GGG70.



Figura 14 – Amostras de ferro fundido GGG70 existente na empresa.

Relativamente às escolhas dos materiais é de realçar três pontos: o primeiro deve-se ao facto de ser interessante do ponto de vista do objetivo do projeto fazer comparações entre aços e ferros fundidos; em segundo lugar decidiu-se escolher um ferro fundido uma vez que são menos comuns estudos de fadiga com este tipo de material e, por fim, a empresa parceira deste trabalho tem todo o interesse em testar estes materiais, uma vez que são, com grande frequência, usados em órgãos ou componentes de certas máquinas. Mais especificamente o ferro fundido nodular GGG70 é usado na construção dos porta satélites das engrenagens planetárias, com a função específica de movimentar as rodas dentadas designadas planetárias ou satélites.

3.2 Materiais de deposição

Durante todo o trabalho foram usados vários materiais de deposição. Grande parte deles foram usados para realizar testes preliminares de deposições em amostras, com o objetivo de escolher os materiais e parâmetros de deposição para os provetes de fadiga finais. As últimas deposições foram usadas com um único material escolhido após análise de resultados dos ensaios de deposições preliminares. Toda a informação relativa a esses materiais fornecidos na forma de pós é apresentada posteriormente no presente relatório, num capítulo onde se descreve todos os testes preliminares bem como as deposições finais. Ainda assim, na Tabela 7 encontra-se a lista de materiais de deposição analisados.

Tabela 7 – Lista de pós analisados

Nome do pó	Fornecedor	Caracterização do pó
<i>EuTroloy 16606</i>	Castolin Eutectic®	Pó martensítico baseado em aço para trabalho a frio
<i>Inconel 625</i>	Oerlikon®	Pó à base de superliga de níquel
<i>Metco 42C</i>	Oerlikon®	Pó à base de liga de aço inoxidável martensítico
<i>Fe 39</i>	PLASweld™	Pó à base de liga de ferro

3.3 Método de obtenção e preparação dos provetes

Anteriormente foram apresentados com mais detalhe os materiais selecionados para a realização dos testes de fadiga, materiais esses que existiam em stock nos armazéns da empresa e que foram escolhidos porque havia interesse no seu estudo à fadiga aquando de deposições por *laser cladding*.

Ainda que superficialmente referido em subcapítulos passados, o processo usado para o fabrico dos provetes, que posteriormente seriam revestidos por *laser*, foi a maquinagem, mais especificamente a fresagem e a retificação. Contudo, previamente a esse processo foi necessário cortar os de materiais como referido no subcapítulo 3.1 *Materiais base*. De modo a que fosse possível a maquinagem das peças, uma vez que, é ideal apenas remover material (apara) em gamas de espessuras baixas (até 5 mm) e, em contrapartida, remoções elevadas de material (apara) causariam danos tanto na ferramenta das fresadoras/retificadoras como no próprio material, as amostras de ferro fundido nodular GGG70 e de aço de cementação 18 CrNiMo 7-6 foram sujeitas ao corte numa máquina de serra-fita, para assim se aproximarem da geometria e dimensões pretendidas.

Após este corte, os provetes apresentavam as seguintes dimensões médias:

- Comprimento = $223 \pm 0,5$ mm;
- Largura ≈ 27 mm;
- Espessura ≈ 7 mm.

A Figura 15 mostra o resultado após a realização do corte em ambos os provetes.

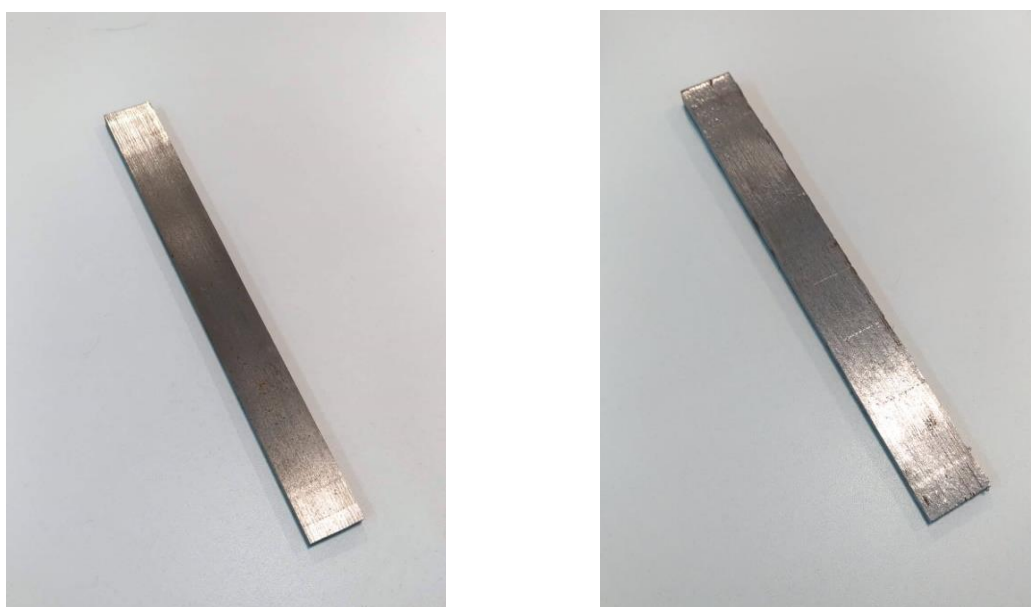


Figura 15 – Proвете de GGG70 após corte (à esq.) e provete de 18 CrNiMo 7-6 após corte (à dir.).

Após este processo de corte, entrou-se no processo de maquinagem propriamente dito. Procedeu-se, assim, à ordem de trabalho que se encontra disponível através do desenho técnico apresentado em ANEXO A. Por outras palavras, o objetivo seria tornar as dimensões iniciais dos provetes nas geometrias corretas e as dimensões ideais para se proceder, posteriormente, ao revestimento a *laser* numa caixa criada para o efeito na superfície do provete. Essa zona trata-se de uma ranhura que foi intencionalmente criada, de modo a que se pudesse encher através do processo de *laser cladding* recuperando-se assim a espessura original do provete. De seguida apresentam-se as dimensões finais das amostras produzidas, bem como o seu aspeto e aparência após esse fabrico através das diferentes perspetivas retratadas nas Figura 16, Figura 17 e Figura 18:

- Comprimento = $223 \pm 0,5$ mm;
- Largura = $25 \pm 0,1$ mm;
- Espessura = $4 \pm 0,1$ mm;
- Comprimento da ranhura = 100 mm;
- Largura da ranhura = $25 \pm 0,1$ mm;
- Espessura da ranhura = 1 mm.

As dimensões apresentadas são as dimensões finais após fresagem e retificação dos provetes. De referir que a fresagem e retificação apenas aconteceram nas faces de baixo e de cima das amostras (face de 223×25 mm²), como já foi referido no início deste capítulo, resultando uma rugosidade de aproximadamente $0,4 \mu\text{m}$.

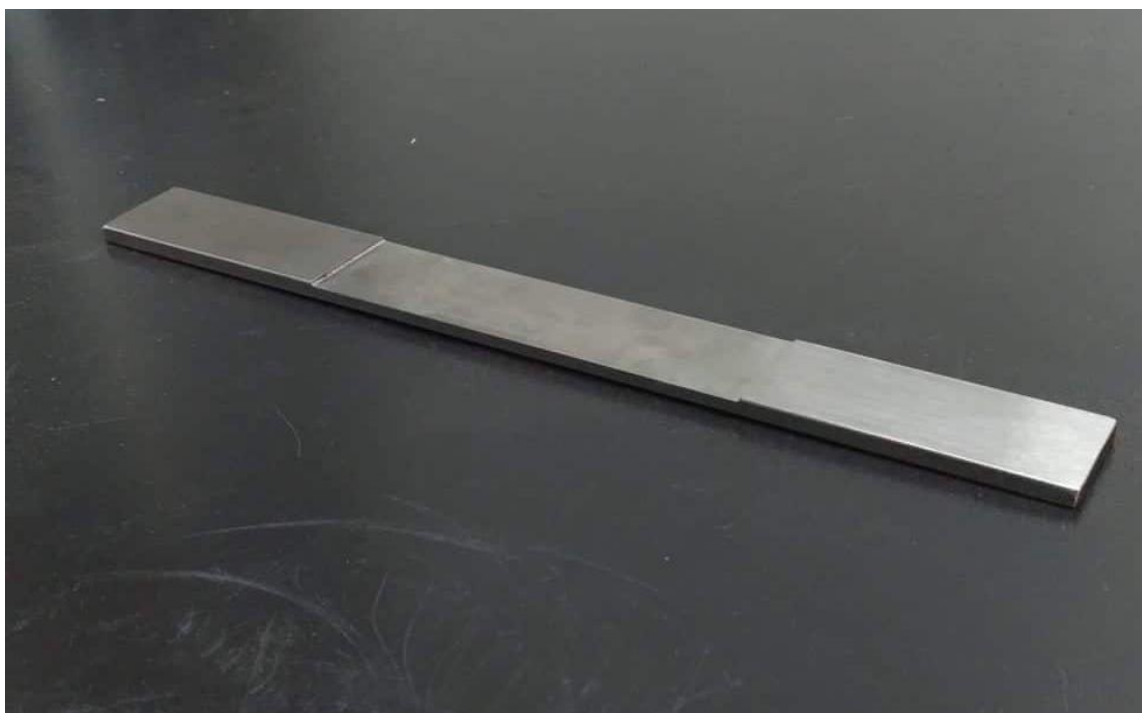


Figura 16 – Provete - Perspetiva 1.

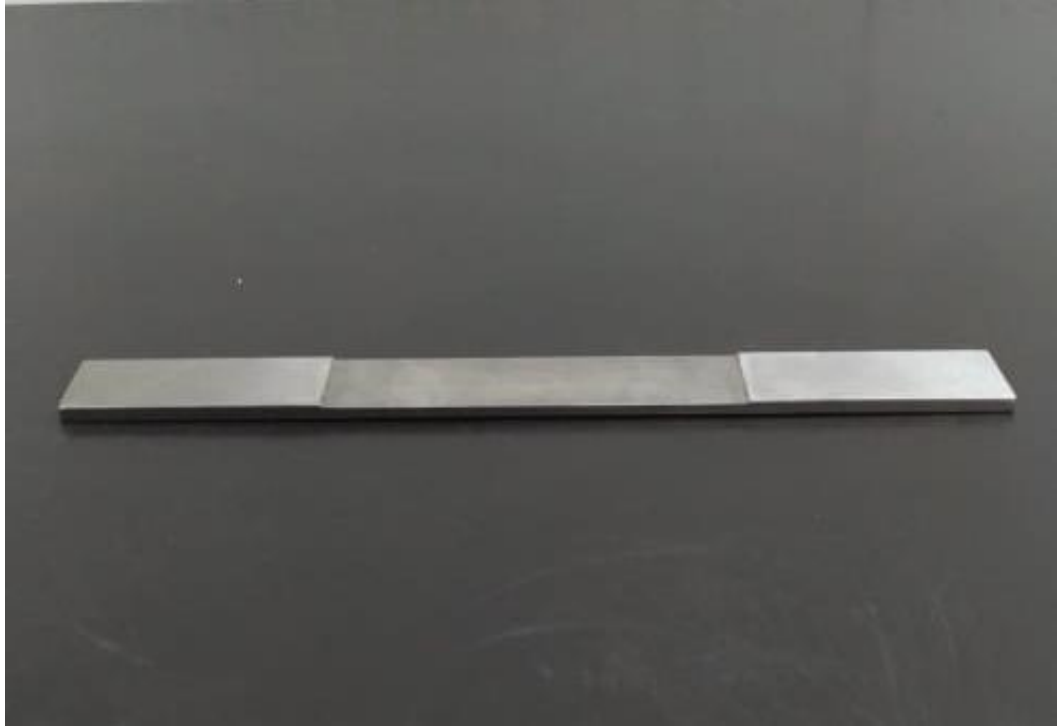


Figura 17 – Provete - Perspetiva 2.



Figura 18 – Provete - Perspetiva 3.

Após o processo de fabrico dos provetes, estes foram sujeitos ao enchimento da ranhura através da máquina de *laser cladding* existente no grupo SERMEC, atrás descrita. Assim sendo, o seguinte capítulo focar-se-á em descrever todo o processo de revestimento dos provetes dando, também, especial foco aos testes preliminares realizados para determinação dos parâmetros mais indicados e do pó de deposição mais apropriado a serem usados nestas amostras fabricadas.

3.4 Máquina de *laser cladding* usada na SERMEC Group

Esta secção prende-se com a apresentação detalhada da máquina de *laser cladding* existente na empresa e que foi utilizada para fazer todos os testes e deposições finais retratadas no presente relatório.

A máquina de *Laser Cladding* existente na SERMEC Group - Wind Power é denominada por ERLASER® HARD+CLAD e é um sistema *laser* adaptado às necessidades do material *laser* e ao tratamento superficial de metais especialmente para transformações de endurecimento controlados por temperatura (têmpera) e para aplicações de revestimento de metais (soldadura com enchimento de pós). Dadas as especificações da empresa, este sistema foi construído e adaptado especificamente para a finalidade do uso previsto por parte da SERMEC Group.

O conceito da máquina é baseado num *robot* industrial de 6 eixos, onde todos eles estão conectados à unidade de controlo do *robot*. Esses eixos podem ser postos opcionalmente numa mesa linear com limites de trabalho de 4 metros. Esta máquina foi concebida para trabalhar automaticamente um número elevado de peças com uma participação bastante condicional do operário. Dado o processo de produção automático, este sistema oferece várias vantagens decisivas como:

- Produção com número mínimo de pessoas a operar. Estas estão indiretamente envolvidas no processo, uma vez que apenas criam as condições para o trabalho automático (como por exemplo, a criação do programa de trabalho) e não colaboram diretamente no processo de transformação das peças;
- Operários amplamente protegidos contra perigos, dada a colaboração indireta;
- Peças trabalhadas em número muito elevado.

Relativamente à tecnologia *laser*, é de realçar que esta tecnologia pertence aos componentes principais do sistema. Através do seu carácter de alta energia, alta resolução espacial e flexibilidade, é uma tecnologia universal que oferece uma eficiência enorme. Outra característica desta tecnologia é a união de alta precisão com os tempos de ciclos curtos de produção.

O sistema utiliza a tecnologia *laser* aplicando o raio *laser* como ferramenta, cuja transformação do material da peça acontece diretamente através dessa ferramenta.

Para a utilização do raio *laser*, o sistema usa 3 componentes, sendo eles a fonte do raio *laser*, a linha do raio e a ótica de focalização. A fonte de raio *laser* emite o próprio raio que, através da linha de raio, conduz o mesmo até à ótica de focalização. A intensidade de potência do *laser* é, geralmente, insuficiente durante a passagem através da condução do raio e, é por isso que o raio *laser* deve ser focalizado e passar pela ótica de focalização (Figura 19). Esta ótica de focalização centraliza o raio *laser* (raio convergente) num pequeno diâmetro (ponto de focalização). Em seguida, o raio *laser* diverge novamente. No fundo, esta focalização une o raio *laser* de modo a que este atinja, com uma pequena secção transversal positiva, o material da peça.

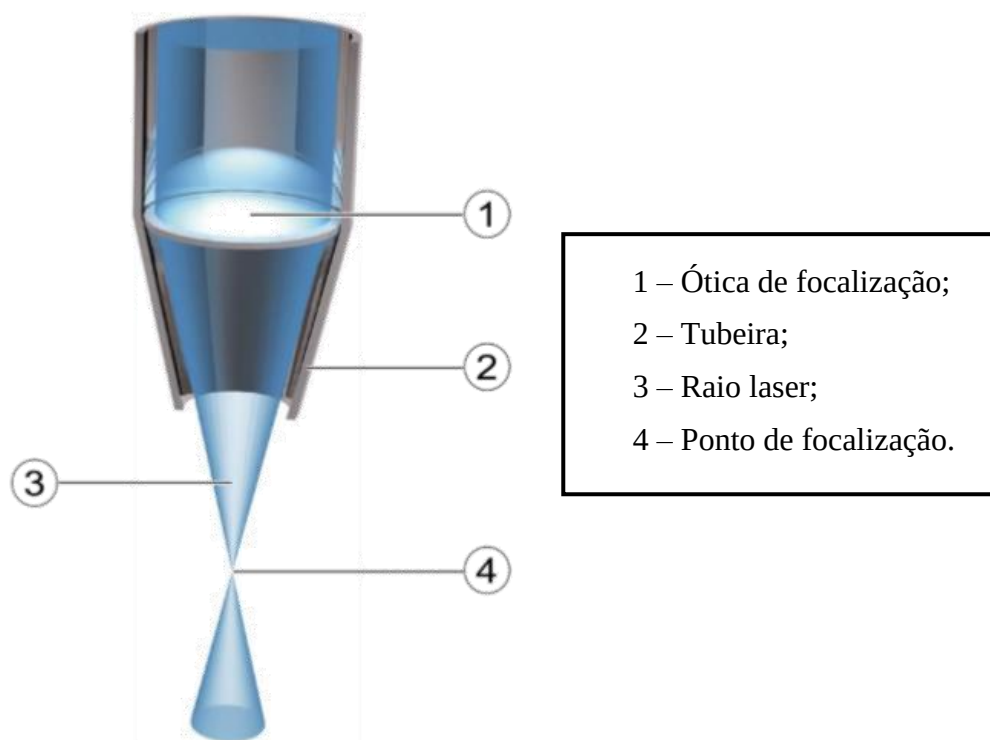


Figura 19 – Focalização do *laser cladding* (GmbH 2015).

Com isto, é possível ter elevadas potências e alta resolução espacial, isto é, uma precisão e um local de áreas estritamente focado em termos de incidência.

No processamento dos materiais a *laser* injeta-se geralmente pouca energia no componente, em comparação com os métodos convencionais de soldadura. Desta forma, a distorção do componente é extremamente baixa e, desse modo, as possibilidades de processamento do material são melhoradas consideravelmente. Eis algumas vantagens da tecnologia *laser*:

- O material da peça é processado no ponto exato;
- A peça será trabalhada sem interferências indesejadas;
- Possibilidade de trabalhar com materiais termicamente sensíveis nas imediações do local de trabalho.

O sistema trabalha de acordo com o princípio da “ótica voadora”. Este princípio consiste no repouso do material da peça enquanto esta é trabalhada, graças ao movimento do processamento ótico.

No que diz respeito ao processamento por raio *laser*, a precisão é um dos fatores mais importantes para a qualidade do resultado. O princípio básico consiste no raio *laser* atingir o material da peça na área de foco. Dado que o diâmetro do foco e a sua localização estão estritamente definidos em direção ao raio, a tolerância para os desvios da posição exata é muito baixa. Fica assim claro que até mesmo alterações mínimas podem ter efeitos negativos sobre a qualidade do resultado, como por exemplo vibrações da base (fator externo, independente dos parâmetros do sistema).

Dentro dos parâmetros do sistema e segundo a ERLAS[®], o resultado no processamento de material por este equipamento será determinado principalmente pelos seguintes:

- Potência *laser*;
- Diâmetro do foco;
- Velocidade de avanço;
- Qualidade dos componentes.

Ainda assim, existem outros parâmetros que segundo outras fontes se revelam também de extrema importância e vão ser abordados mais adiante. Todos estes parâmetros podem apresentar interdependências e, desta maneira, o processamento de materiais por *laser* deve ser considerado como um processo complexo. É importante realçar que a mudança de parâmetros predefinidos pelo fornecedor pode interferir no trabalho eficaz do sistema.

Antes de apresentar mais pormenorizadamente o revestimento a *laser* proporcionado pelo equipamento em causa, é importante referir que este sistema também permite a realização de têmpera a *laser* em locais limitados, numa fina camada superficial, sem a necessidade de substâncias adicionais de arrefecimento como água ou óleo. Contudo, dado o foco do trabalho em revestimento a *laser* apenas este tema será mais debatido.

No processo de revestimento por raio *laser*, que é um trabalho de soldadura, o raio produz uma bacia de fusão no componente. O material do revestimento em forma de pó é fornecido na zona de fusão por uma corrente de gás inerte através de um injetor de pó. Esse injetor de pó, juntamente com a ótica *laser*, são movimentados sobre a superfície da peça de trabalho. Assim, poderão ser produzidos cordões únicos em superfícies fechadas ou várias camadas sobrepostas como também a construção de soldadura de grande volume.

As áreas de aplicação do revestimento por raio *laser* são, entre outras, as seguintes:

- Soldadura de reparação de ferramentas;
- Soldadura de reparação de pás de turbinas;
- Trabalho de soldadura de camadas resistentes a desgaste;
- Soldadura de insertos de ferramentas.

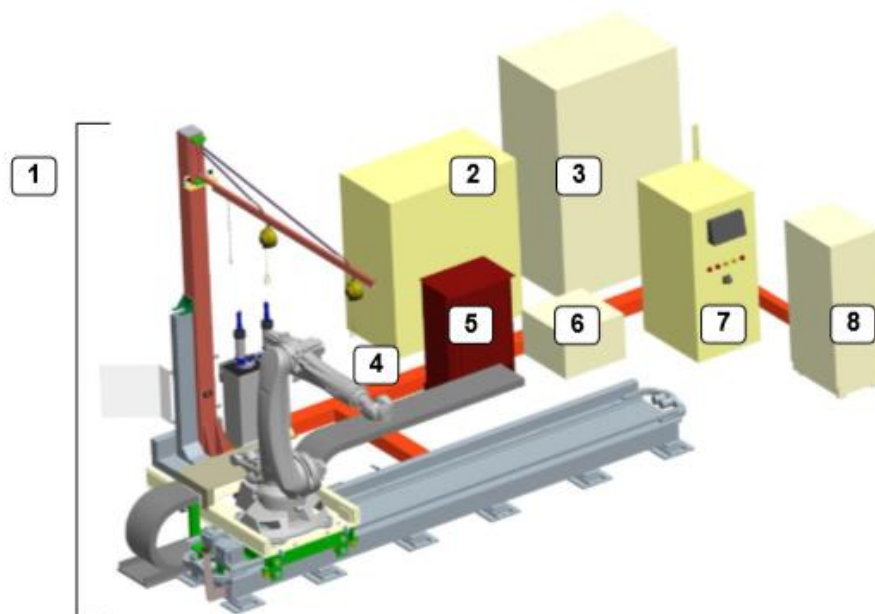
As vantagens do revestimento por raio *laser* são, entre outras, as seguintes:

- Recuperação de componentes desgastados e danificados;
- Produção de novos contornos;
- Mínimo de distorção;
- Melhoria nas propriedades das peças através da combinação de materiais diferentes;
- Redução de custos bem como de tempo de processamento.

Relativamente à existência de gases protetores no processo de revestimento a *laser*, a qualidade do resultado pode ser melhorada se se estiver sob o efeito de um desses gases protetores. Como gás protetor entende-se um gás que impeça ou restrinja a oxidação do material da peça durante o seu processamento. O gás protetor reprime o ar circundante, evitando assim que o material fundido possa reagir com o oxigénio atmosférico.

Para evitar uma oxidação será conduzido gás protetor para o local de revestimento durante o processo. O fornecimento do gás realiza-se através de um injetor de pós tangente que se encontra dentro do cabeçote de processamento. Por meio deste, o gás protetor flui para o material da peça. Desse modo, para que o próprio gás protetor não reaja com o material da peça, serão utilizados, de preferência, gases inertes no revestimento por raio *laser*. Gases inertes são pobres na reação, isto é, não reagem de modo algum ou apenas ligeiramente com o material da peça. Como gás protetor podem ser utilizados vários gases, no entanto o árgon (Ar) é o gás protetor utilizado na *SERMEC Group* e, ao mesmo tempo, é dos gases mais utilizados para proteção em *laser cladding*.

A Figura 20 ilustra o *layout* do sistema *laser* com os seus blocos principais:



- 1 – Unidade de processamento;
- 2 – Aspiração;
- 3 – Refrigerador do laser;
- 4 – Canal a cabo;
- 5 – Armário de distribuição do comando robot;
- 6 – Refrigerador do cabeçote de processamento;
- 7 – Dispositivo laser.

Figura 20 – *Layout* do sistema *laser* existente na empresa (GmbH 2015)

Uma das principais divisões do *layout*, a unidade de processamento (1 – Figura 20) é ilustrada na Figura 21 e é constituída pelos seguintes componentes:

- Guincho com viga e suporte de equilíbrio (1);
- *Robot* com ótica de processamento e cabeçote de processamento (2);
- Unidade linear com carril deslizante e interruptor de referência (3);
- Alimentação de energia (4);
- Transportador de pós (5);
- Armário de distribuição de substâncias (6).

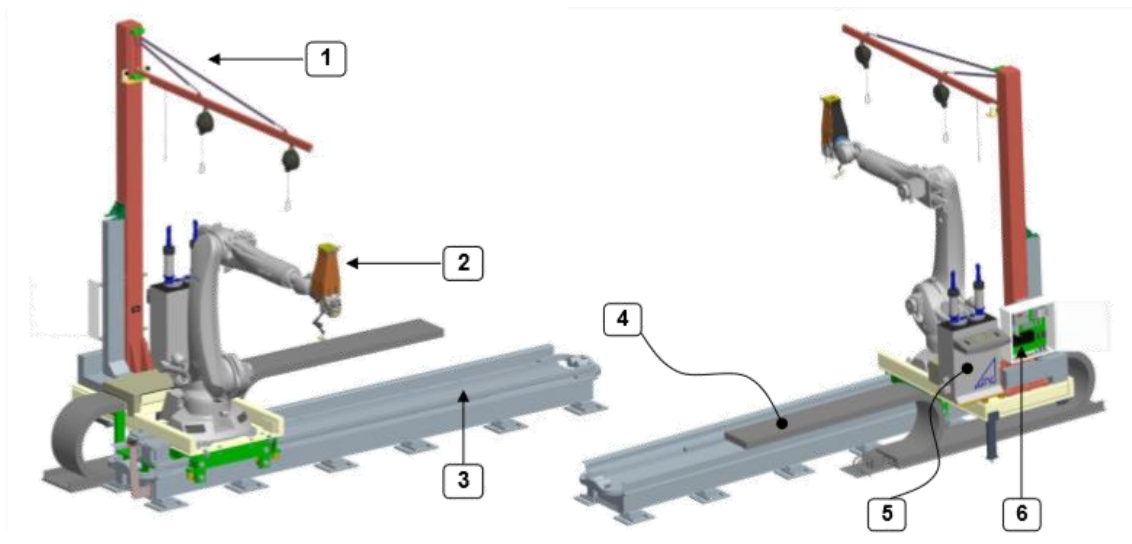


Figura 21 – Unidade de processamento *laser* (GmbH 2015).

No *robot* está montada a ótica de processamento que é movimentada por este em cima de uma trajetória programada sobre a peça de trabalho (Figura 22). O *laser* é conduzido do dispositivo *laser* à ótica de processamento através de um cabo de fibra ótica. A ótica de processamento, como já mencionado atrás, focaliza o raio *laser* sobre a peça de trabalho.



Figura 22 – Robot com ótica de processamento (GmbH 2015).

Durante o processo de revestimento e com a ajuda do transportador de pó (Figura 23), será aplicado pó sobre a peça de trabalho através do injetor de pó que está montado no cabeçal de processamento.



Figura 23 – Transportador de pó (GmbH 2015).

Fora da cabina de proteção, encontra-se os componentes de alimentação do gás protetor e ar comprimido, fazendo parte do armário de distribuição de substâncias.

O sistema de aspiração e filtros (2 – Figura 20), uma outra secção do sistema, aspira e filtra do interior da cabina de proteção o ar contaminado com emissões do processo.

Outra das divisões do sistema é o refrigerador *laser* (3 – Figura 20). Este existe porque é necessário retirar do sistema excessos de calor e/ou energia térmica de modo a protegê-lo contra sobreaquecimento. Se o sistema não for arrefecido, poderá sofrer uma falha técnica pelo que o seu arrefecimento adequado é um ponto essencial no processo. Alguns dos componentes do sistema que são arrefecidos são:

- Dispositivo *laser*;
- Colimação;
- Cabeçal de processamento.

No dispositivo *laser* está integrado um circuito de refrigeração interno que o arrefece. Este circuito de refrigeração interno deve ser arrefecido por um segundo circuito de refrigeração externo. É para isso que serve o refrigerador do *laser* que se auto regula sobre o seu tempo de funcionamento através de uma janela de temperatura ajustável do fluido refrigerante.

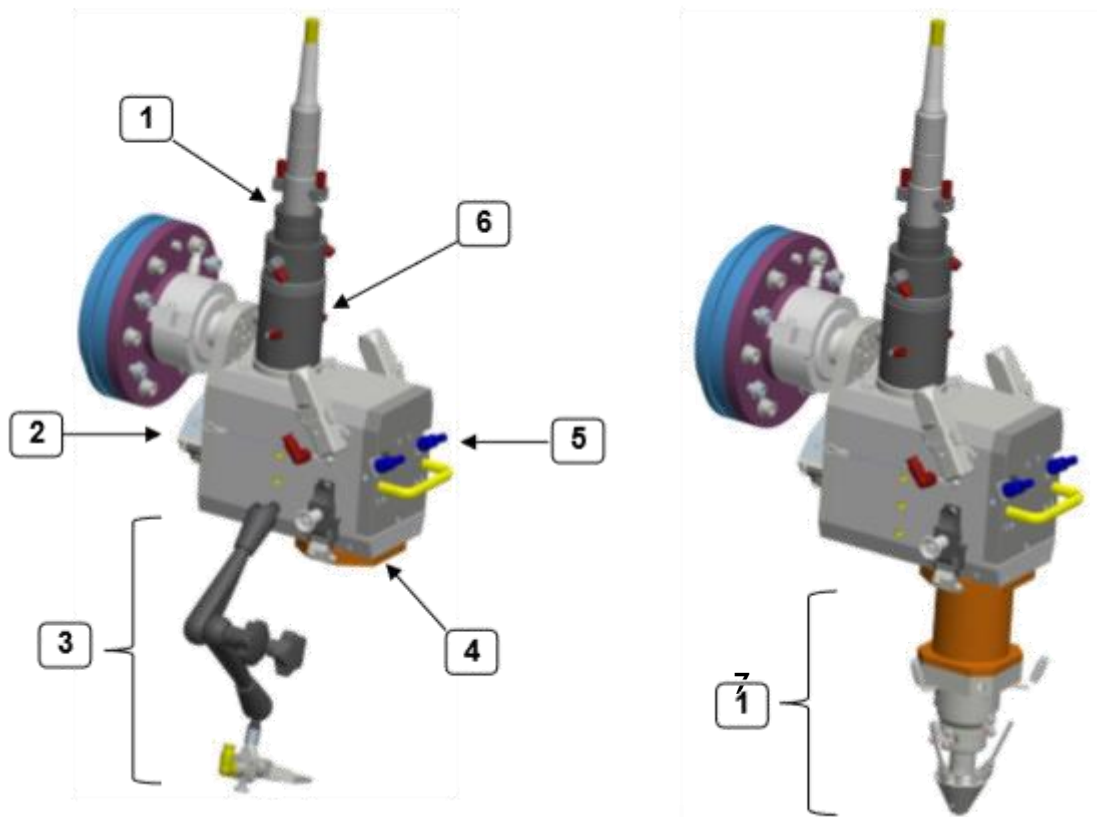
Uma outra divisão do sistema é o refrigerador do cabeçote de processamento (6 – Figura 20), que arrefece os seguintes componentes:

- Espelho de integração;
- Cabeçote de processamento ou injetor de pós.

Outra divisão do layout é o dispositivo *laser* (7 – Figura 20). Nele é produzido o raio *laser* que é conduzido ao cabeçal de processamento através de um cabo de condução de luz. O dispositivo de *laser* utilizado é um *laser* de díodo com fibras acopladas/*laser* de disco (LDF 3000-100).

Também é importante referir a existência e importância do armário de distribuição e sistema-painel de controlo (8 – Figura 20), uma outra divisão do *layout* do sistema. Existem outras partes do sistema como o controlador do *robot* e as luzes de sinalização.

Outro aspeto importante da máquina de *laser cladding* é o cabeçote de processamento. Existem dois cabeçotes de processamento: um indicado para a têmpera do material e outro para o revestimento de componentes através de um injetor de pós (Figura 24). A mudança destes cabeçotes é feita facilmente com a mudança do espelho de têmpera para o espelho de focalização e montando-se o bico (*nozzle*) de injeção de pós.



1 – Acoplamento laser;

2 – Pirómetro;

3 – Tripé de articulação e *cross jet*;

4 – Placa de cobertura;

5 – Tubagens para refrigeração a água;

6 – Colimação;

7 – Injetor de pós.

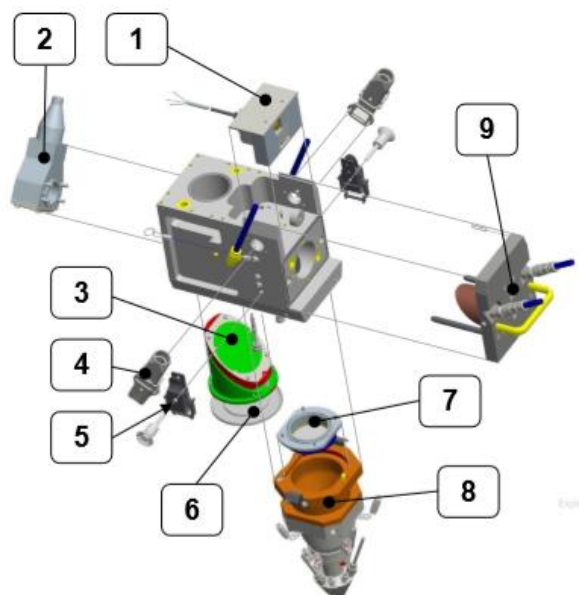
Figura 24 – Cabeçote para têmpera (à esq.) e cabeçote para revestimento (à dir.) (GmbH 2015).

Uma informação importante a anunciar é que o *nozzle*, independentemente das suas características e especificações, tem de ficar a uma distância típica de trabalho de 12 mm do material a processar.

O primeiro não foi usado durante a dissertação enquanto o segundo foi o utilizado e por isso merece maior destaque de pormenorização. Assim, é importante realçar que com esse cabeçote, o processo de revestimento através da injeção de pós é conduzido por uma potência *laser* constante. A fim de se obter um revestimento ideal, deve ser determinada empiricamente essa potência *laser* ideal para o revestimento. Essa potência depende, então, dos seguintes fatores:

- Condutibilidade térmica da peça de trabalho a ser revestida;
- Material do pó;
- Densidade do pó;
- Pressão do gás protetor;
- Espessura de aplicação;
- Velocidade de revestimento.

De seguida, apresenta-se ilustrativamente através da Figura 25 as conexões dos cabeçotes de processamento.



- | | | |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1 – Suporte de sensor; | 2 – Suporte de ótica; | 3 – Suporte de dicroico; |
| 4 – Fichas Hasting; | 5 – Fecho; | 6 – Tampa de dicroico; |
| 7 – Suporte de vidro protetor; | 8 – Injetor de pó; | |

Figura 25 – Conexões do cabeçote de processamento (GmbH 2015).

Existem outros componentes da máquina que não foram aqui retratados em maior detalhe dada a sua menor importância para o desenvolvimento do presente trabalho. Um desses exemplos foi a existência de um pirômetro na máquina que calcula, com base no comprimento das ondas da radiação térmica, a temperatura real do ponto focal, num intervalo entre 350°C - 1300°C e com uma precisão de ± 5 K, e, assim, determina a potência do *laser*.

De seguida são apresentados alguns dados técnicos do ERLASER® HARD+CLAD:

1. *Laser* – *Laserline LDF 3000 - 100*

- a. Máxima potência: 3000 W;
- b. Comprimento de onda: 900 – 1030 nm (dependente da potência do *laser*);
- c. Qualidade do feixe: ≈ 100 mm*mrad;
- d. Fibra: $\varnothing = 1.0$ mm;
- e. Obturador integrado: Tempo de obturação < 150 ms;
- f. Humidade máxima: 80% a 25°C;

O próprio *laser* de díodo (*LED laser mode*) não contém dispositivo de proteção e é um sistema de *laser* “Class 4” de acordo com a norma EN 60825 – 1.

2. *Robot* – *KUKA KR 90 R3100 ultra*

- a. Carga útil: 90 kg;
- b. Raio de trabalho: 3100 mm;
- c. Precisão de posicionamento: ± 0.06 mm;
- d. Peso: ≈ 1250 kg;
- e. Carga conectada nominal 1.4 kW (400 V, 3 fases);
- f. Unidade de controlo: KR C4;
- g. Preparado para 2 eixos adicionais.

Relativamente aos parâmetros do processo de *laser cladding* exclusivamente e, segundo o fornecedor da máquina ERLASER® HARD+CLAD, apresentam-se algumas informações na Tabela 8 (GmbH 2015).

Tabela 8 – Parâmetros do processo de *laser cladding* segundo a máquina usada (Dierken 2013)

<i>Parâmetros do processo</i>	<i>LASER CLADDING</i>
<i>Potência do laser</i>	0.3 – 3 kW
<i>Intensidade do laser</i>	$10^4 - 10^5$ W/cm ²
<i>Geometria de aplicação</i>	Arredondado
<i>Largura do percurso</i>	0.5 – 5 mm
<i>Velocidade</i>	$\approx 0.5 - 2.5$ m/min
<i>Gás protetor</i>	Ar, < 5 L/min
<i>Material de enchimento</i>	Pó ou Fio
<i>Temperatura do processo</i>	Acima do ponto de fusão do material base

Para finalizar, apresenta-se na Figura 26 duas perspetivas da máquina de *laser cladding* usada no presente trabalho.

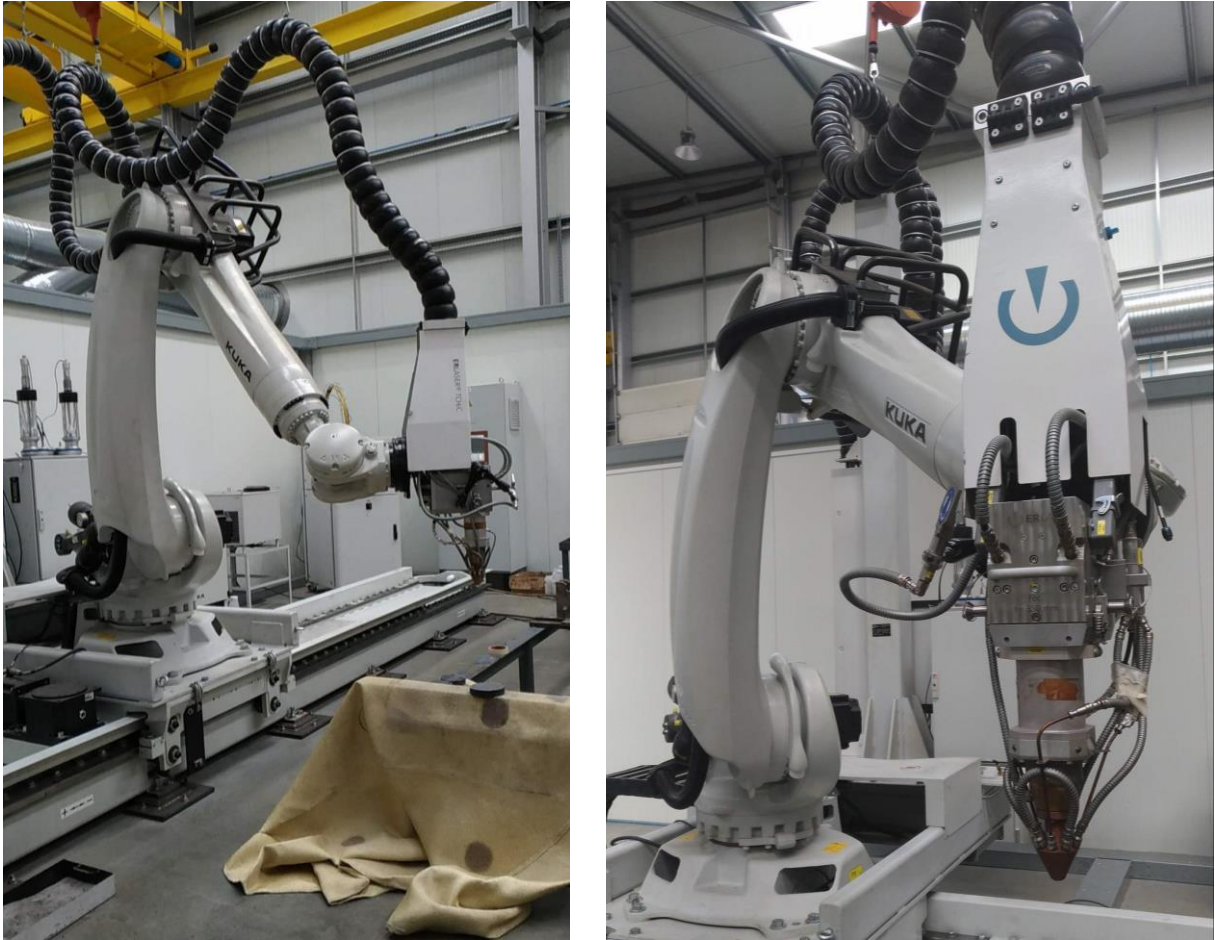


Figura 26 – Duas perspetivas da máquina de *laser cladding*.

3.5 Provetes revestidos e parâmetros usados

Este subcapítulo visa exclusivamente apresentar os parâmetros definidos que foram usados para as deposições finais dos provetes, bem como figuras dos provetes de aço e ferro fundido revestidos. Os mesmos sofreram o processo de revestimento através da máquina de *laser cladding* apresentada no subcapítulo anterior. A Tabela 9 expõe os parâmetros usados e a Figura 27 exemplares das amostras revestidas. De notar que todos os detalhes e pormenores da obtenção dos referidos parâmetros e das deposições atingidas serão explicitados passo a passo no capítulo seguinte.

Tabela 9 – Parâmetros usados nas deposições dos provetes

	Potência do laser (W)	Velocidade do processo (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Passo (mm)
GGG70	1000	7	17,55	1,8
18 CrNiMo 7-6	1000	7	17,55	1,8
GGG70	1100	8	23,4	1,8
18 CrNiMo 7-6	1100	8	23,4	1,8

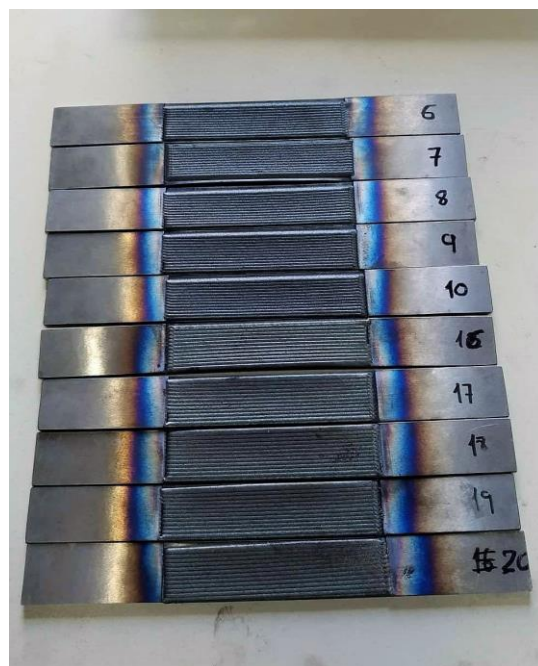
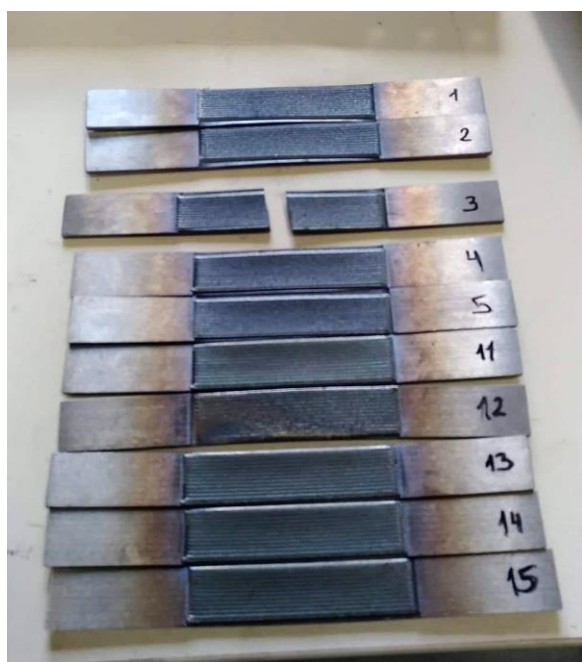


Figura 27 – Provetes revestidos de ferro fundido (à esq.) e aço (à dir.).

3.6 Desempeno dos provetes

Previamente à realização dos ensaios de fadiga foi necessário o desempeno dos provetes para garantir uma correta fixação dos provetes na máquina de ensaios de fadiga na configuração de flexão em 3 pontos. Assim, procedeu-se ao desempeno dos provetes através da utilização de uma prensa hidráulica como pode ser visualizado pela Figura 28. Importa referir que durante o processo de desempeno dos provetes rompeu-se 1 provete de ferro fundido por excesso de deformação e ductilidade limitada desse tipo de material.



Figura 28 – Desempeno dos provetes com prensa hidráulica.

3.7 Máquina de ensaios de fadiga e condições iniciais dos ensaios

A máquina utilizada para a realização dos ensaios de fadiga apresenta-se na Figura 29, sendo esta uma máquina de ensaios de flexão em três pontos eletromecânica. Esta apresenta um motor trifásico com uma velocidade de rotação de 1385 rpm permitindo uma frequência dos ensaios de fadiga de 23 Hz. O comprimento efetivo utilizado entre apoios na máquina foi de 150 mm, sabendo que o comprimento dos provetes utilizados nos ensaios era cerca de 220 mm. Esta máquina realiza os ensaios em controlo de deslocamento, sendo a gama de deslocamento definida através de um excêntrico cuja regulação é feita manualmente. Esta máquina possui, ainda, duas células de carga (uma em cada um dos apoios) com capacidade de carga de 30 kN e os sinais das células de carga são registados periodicamente através de um sistema de aquisição de dados, Spider 8, e um software de aquisição, software Catman.

Os ensaios realizados são ensaios de fadiga de flexão plana em três pontos. Foi necessário impor, então, em todos os ensaios, uma pré-carga, sendo esta pré-carga variável entre todos os materiais dos provetes utilizados: aço e ferro fundido. Contudo, esses valores de pré-carga variavam entre 400 a 600 N. Desta forma, quando se inicia um ensaio de fadiga, o provete já possui uma determinada deformação garantindo-se, deste modo, um contacto constante com os apoios (Ramos 2016). Definiu-se como gama de deslocamentos de deformação 1,85 mm em todos os provetes, sejam de aço ou ferro fundido.

Ainda de referir que o sistema de aquisição guarda sequencialmente os ficheiros de resultados. Esses diferentes ficheiros de aquisições dos ensaios apresentam uma duração de aproximadamente 0,43 segundos e o intervalo entre aquisições de 150 segundos, ou cerca de 2 minutos e meio. Por cada ficheiro são gravados 2087 pontos.



Figura 29 – Máquina de flexão em 3 pontos usada nos ensaios de fadiga.

4. Resultados e discussão

4.1 Testes feitos pela ERLAS®

Este capítulo e subcapítulo inicia-se com uma revisão bibliográfica que servirá como referência aos resultados discutidos em diante. Segundo o relatório de Dr. Eng. Roland Dierken (2013) realizado na ERLAS®, podem ser retiradas algumas conclusões *a priori* sobre os parâmetros, os cordões e todas as especificações por trás do processo de revestimento da máquina que foi usada durante o presente trabalho.

Foram definidos alguns requisitos para a realização dos referidos testes como o material base ser ferro fundido GGG70 e o material de deposição ser Eutroloy 16604 (aço inoxidável martensítico) com uma dureza aproximada de 40 HRC e a composição química da Tabela 10 em valores percentuais mássicos (%) (Dierken 2013).

Tabela 10 – Composição química do Eutroloy 16604 (Dierken 2013)

C	Cr	Co	Mo	Fe
≈ 0,2	≈ 15	≈ 15	≈ 2,5	Restante

Para estes testes foram sendo alterados alguns parâmetros, nomeadamente a potência do *laser* (P) e a taxa de deposição (F), tendo-se mantido constante a velocidade de avanço do processo em 13 mm/s. Na Tabela 11 apresentam-se os resultados deste estudo.

Tabela 11 – Resultados dos testes realizados pela ERLAS (Dierken 2013)

V = 13 mm/s	P = 1400 W	P = 1700 W	P = 2000 W
F = 50 %			
F = 30 %			
F = 10 %			

Nota: a taxa de deposição estando em percentagem significa que é a quantidade relativa depositada em relação à quantidade máxima de pós existente no transportador de pós da máquina.

Através da Tabela 11, é possível retirar as seguintes conclusões:

- Quanto mais baixa a potência do *laser* e maior a taxa de deposição, é mais expectável que ocorra delaminação (separação de camadas), defeitos nas

camadas e ausência de ligação forte entre o material depositado e o material base;

- Quanto maior a potência do *laser* e mais baixa a taxa de deposição, é mais expectável o sobreaquecimento da peça, uma maior zona termicamente afetada, maior tendência para a criação de porosidades e uma maior tendência à criação de fendas no material base;
- A taxa de deposição influencia mais decisivamente a geometria e o formato do cordão enquanto a potência do *laser* tem mais impacto na junção e no contacto entre o material base e o material de adição;
- Por observação da Tabela 11 e desprezando qual o material base a ser usado bem como o material de adição, é aconselhável pela ERLAS® a criação de cordões com a geometria e formato como o apresentado no centro da tabela com um rebordo verde. Está claro que dependerá sempre de caso para caso, mas em geral é indicado usar-se sempre valores intermédios de potência de *laser* e de taxas de deposição evitando-se, assim, geometrias irregulares, como as apresentadas no canto superior esquerdo da tabela, ou evitando-se diluições elevadas entre os materiais, como apresentado no canto inferior direito da tabela (Dierken 2013).

Assim sendo, após este estudo a ERLAS® apresenta as suas conclusões e avaliações dos cordões formados e das regiões envolventes ao processo de revestimento.

Começando pelo rácio entre largura e altura de cordões únicos (Figura 30), a empresa aconselha os rácios de 3:1 ou 4:1 pois rácios deste tipo provaram a formação de cordões homogéneos.

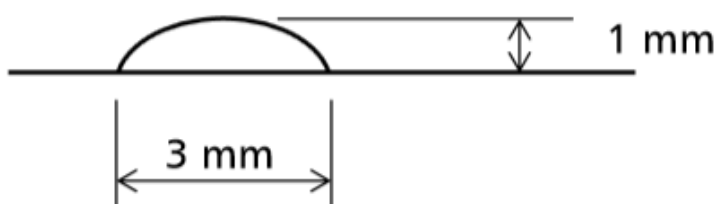


Figura 30 – Geometria ideal de cordões únicos. (Dierken 2013).

De seguida passa-se à avaliação de fendas em cordões singulares (Figura 31). No geral, estas formam-se se os esforços/tensões residuais sob o material excederem os limites desse mesmo material. As principais razões para esta situação são literalmente as diferentes propriedades da camada de material e do próprio material base, como se pode constatar pelos pontos que se seguem:

- Se as fendas forem no material base, estas ocorrem frequentemente se o material base mostrar ter propriedades de endurecimento;

- Se as fendas forem na camada de revestimento, estas ocorrem devido à limitada soldabilidade do material depositado.

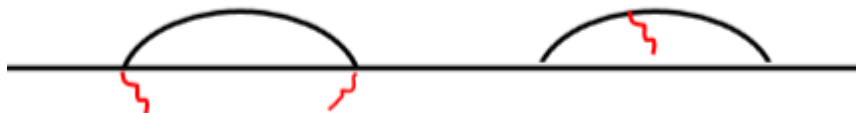


Figura 31 – Formação de fendas no material base e no material depositado (Dierken 2013).

Existem algumas soluções para evitar a criação de fendas como:

- Reduzir a velocidade do processo, de modo a que haja mais calor relativamente à área revestida, uma redução da velocidade no arrefecimento, evitando-se assim um maior endurecimento do material base;
- Reduzir a potência do *laser*, reduzindo assim a altura da camada de cordão e, portanto, redução das tensões no próprio cordão.

Relativamente à formação de poros em cordões singulares (Figura 32), é um fenómeno que acontece com frequência e é bastante influenciado devido às seguintes situações:

- Se a potência do *laser* for demasiado elevada em relação à taxa de deposição de pós, haverá uma entrada excessiva de calor que leva a uma maior fusão e maior efeito de calor no material base;
- Se a superfície do material base não estiver devidamente limpa, isto é, existência de resíduos de óleos, humidade e oxidações;
- Se a cobertura do gás de proteção do material depositado for insuficiente;
- Se a qualidade dos pós depositados for pobre.



Figura 32 – Formação de poros nos cordões (Dierken 2013).

No que diz respeito à formação da conhecida zona termicamente afetada (ZTA), esta tem uma importância relativamente elevada na condição da qualidade do revestimento (Figura 33). Idealmente para o processo de *clad* seria ótimo uma alta resistência de fixação ou “colagem” dessa camada de material com uma influência mínima de calor no material base. Assim sendo, tenta-se atingir a zona termicamente afetada ou camada intermédia o mais pequena possível. No entanto, nessa zona é modificada imperativamente a estrutura do material base e existe um enorme potencial de ocorrência de tensões e subseqüentes

formações de fendas. Para além disso, as propriedades do material depositado serão certamente influenciadas devido à mistura e junção dessas com o material base na ZTA, o que não significa que será à partida um fator negativo pois, por vezes, essa mistura pode melhorar as propriedades finais do material.

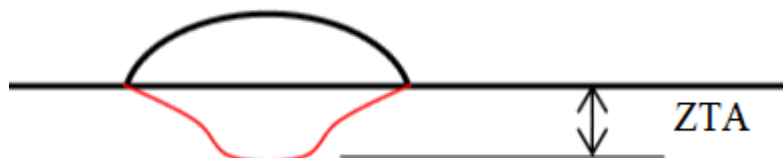


Figura 33 – Zona termicamente afetada (ZTA) (Dierken 2013).

No que toca à formação de fendas em camadas (Figura 34) (já aqui foi tratado formação de fendas em cordões singulares), estas são formadas na sua generalidade se os esforços dentro do material excederem os limites do mesmo, tal como nos cordões singulares. As principais razões para este fenómeno acontecer são exatamente as mesmas descritas na formação de fendas em cordões singulares, no entanto existe um maior número de soluções que podem minimizar o efeito da formação dessas fendas como:

- Diminuir a taxa de deposição que proporciona maior calor na ZTA, reduzida taxa de arrefecimento e permite evitar a transformação do material base;
- Diminuir a potência *laser* de modo a diminuir a altura das camadas e reduzir os esforços e tensões nas mesmas;
- Tornar mais pequenos os cordões e as fronteiras entre camadas, reduzindo assim os esforços entre cordões;
- Adaptar os parâmetros de revestimento ou a sua estratégia/planeamento de aplicação, desde o primeiro para o seguinte cordão;
- Variar a altura do revestimento, de modo a ter mais pequenos *overlaps* dos cordões singulares;
- Recozer ou pré aquecer o material base (caso seja possível).



Figura 34 – Formação de fendas em camadas (Dierken 2013).

Relativamente à formação de poros em camadas, esta situação é bastante influenciada pelas mesmas razões apresentadas para a formação de cordões singulares. Contudo, em cordões por camadas podem existir outras situações que não acontecem em cordões singulares, como por exemplo:

- Se os poros são encontrados entre cordões como demonstrado na Figura 35, então possivelmente a sobreposição é demasiado elevado ou a potência do *laser* não é suficiente;
- Se os poros são encontrados entre o primeiro e o segundo cordão, então possivelmente o cordão é muito alto (recorde-se que a altura de um cordão singular deve ser inferior a 3, no máximo 4).

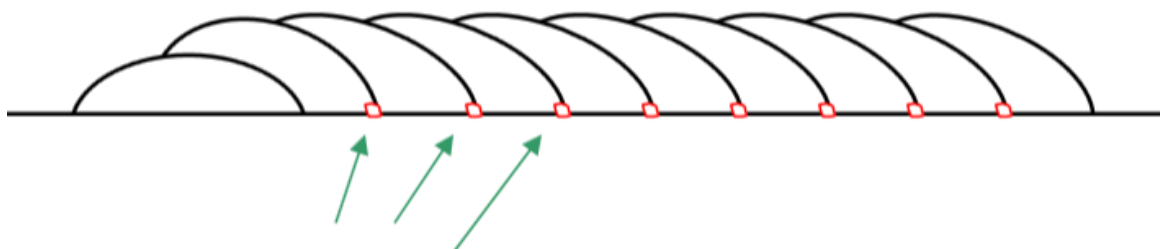


Figura 35 – Formação de poros em camadas depositadas por *laser* (Dierken 2013).

A próxima situação típica que ocorre nas deposições são os *offsets* (distanciamento) dos cordões e as sobreposições (*overlap*) de camadas (Figura 36). Certamente que para a formação de uma camada, cordões singulares são sobrepostos uns aos outros. O *offset* necessário é calculado pela largura do cordão singular e, de modo a obter camadas finas devem ser usadas pequenas sobreposições (tipicamente 30 – 35%), enquanto para obter camadas mais espessas a sobreposição deve ser entre os valores 40 – 60%. Estes limites são dados pela composição do material e o seu comportamento à fusão e, dependendo das propriedades dos materiais, falhas como o aparecimento de poros ocorrem a altas taxas de sobreposição.

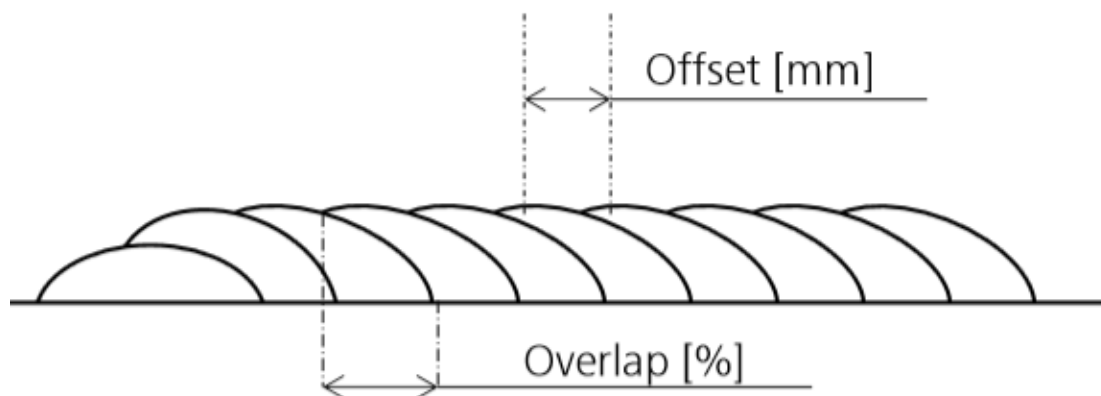


Figura 36 – Offset dos cordões e overlap das camadas (Dierken 2013).

Seguidamente, trata-se de um caso que pode acontecer quando a camada é separada do material base, sendo esse fenómeno denominado por delaminação ou “descolagem” (Figura 37). A origem desta falha é frequentemente explicada da seguinte forma: se o feixe de energia é baixo, o recozimento do material base não é suficiente para assegurar a correta fixação ou fusão do material depositado. Isto pode ocorrer em dois casos principais:

- A potência do *laser* está perto dos limites do processo;
- A taxa de sobreposição é demasiado grande para a potência do *laser* usada.

Assim, se os próprios cordões singulares estiverem:

- Em bom estado, a primeira solução passa por melhorar o *offset*, minimizando a sobreposição;
- Em mau estado ou mediano, a solução passa por mudar os parâmetros do cordão e avaliar com maior foco os cordões singulares. Na maioria dos casos apenas uma das seguintes configurações precisa de ser adaptada: maior potência de laser ou menor taxa de deposição ou menor velocidade do processo.



Figura 37 – Formação de delaminação (Dierken 2013).

Por fim, é importante referir que a influência do calor na construção das camadas é um fator importante para a qualidade das mesmas. Como se pode supor, o principal alvo passa por conseguir camadas o mais homogêneas possível, pelo que o efeito colateral (balanço entre o calor induzido na peça e o transferido por ela) para o material base deve ser o mais constante e mínimo possível, de modo a evitar uma grande zona termicamente afetada (ZTA) como já se viu atrás. Pela Figura 38 constata-se que a potência *laser* é direcionada mais para o material base do que para a zona de sobreposição, originando a ZTA visível na figura (Dierken 2013).

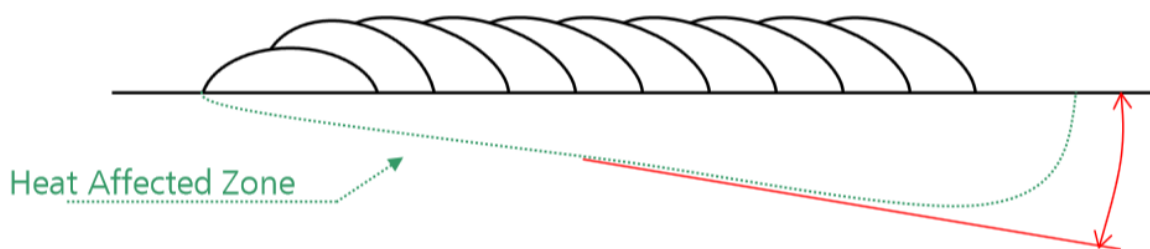


Figura 38 – Influência do calor na construção das camadas (Dierken 2013).

4.2 Testes preliminares de definição dos parâmetros e do pó de deposição

De modo a ser possível a definição dos melhores parâmetros a serem usados aquando das deposições finais nos provetes, foram realizados previamente uma série de testes com amostras simplificadas, com o único objetivo de averiguar a influência de vários parâmetros na construção dos cordões, sejam eles singulares como sendo em camadas simples ou duplas. Assim, esta secção do presente trabalho visa exclusivamente apresentar uma parte dos testes feitos em amostras circulares de aços ou ferros fundidos de materiais arbitrários para que se determinem de uma maneira empírica os melhores parâmetros a serem usados numa fase mais avançada do trabalho. Claro está, apenas se apresentam os melhores resultados obtidos pois só assim se conseguem filtrar os parâmetros mais apropriados consoante se tratar de um aço ou de um ferro fundido.

Começando por amostras relativas a ferros fundidos, é importante realçar que os testes feitos neste material foram realizados em GGG50 o que não invalida tirar conclusões relativas a materiais a serem depositados com parâmetros semelhantes em ferros fundidos GGG70, pois estes são bastante semelhantes. As diferenças encontram-se exclusivamente nas propriedades dos mesmos, não existindo diferenças significativas na composição química de ambos, tal como se pode verificar na Tabela 12 (Djikkamp 2015).

Tabela 12 – Propriedades mecânicas dos materiais GGG50 e GGG70 (Djikkamp 2015)

	Tensão de rotura	Tensão limite de elasticidade	Alongamento	Dureza
GGG50	500 MPa	320 MPa	≈ 7%	170 – 230 HB
GGG70	700 MPa	440 MPa	2 – 3 %	225 – 305 HB

Para além disso, o material depositado no ferro fundido foi um material com a designação “UTP PLASweldTMFerro39”, vulgarmente conhecido na indústria do *laser cladding* como Ferro 39 ou Fe 39, que apresenta uma densidade de 7,8 g/cm³ e uma dureza que ronda entre 38 – 42 HRC, no entanto o seu valor médio é 39 HRC, daí a sua designação de Ferro 39. Para além disso, na sua composição química este pó apresenta como principais constituintes o ferro (Fe), o crómio (Cr) e o molibdénio (Mo) como se pode constatar pela Tabela 13 que segue em baixo com os valores discriminados em percentagem (%) (Voestalpine 2016).

Tabela 13 – Composição química do Fe 39 (Voestalpine 2016)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
0,14	0,3	0,8	6,5	3,5	Restante

Este material foi especialmente desenvolvido para construções aditivas de alta resistência de ferramentas de trabalho a quente e partes estruturais sujeitas a impacto, corrosão e abrasão a altas temperaturas (Voestalpine 2016).

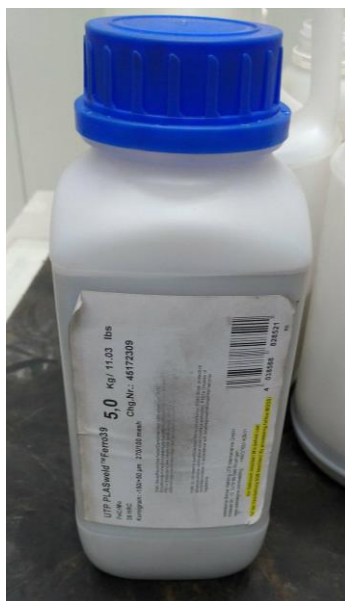


Figura 39 – Embalagem de pó Fe 39 usado na SERMEC - Wind Power.

Na Figura 39 apresenta-se uma embalagem do pó depositado nas amostras de ferro fundido GGG50, e que permitiram posteriormente tirar conclusões acerca dos parâmetros da máquina de *laser cladding* aquando das condições apresentadas.

Relativamente aos testes propriamente ditos, estes começaram pela necessidade de se dispor de 2 patelas de GGG50 na qual se iriam depositar 4 linhas em cada uma delas, como se pode observar pela Figura 40. A linha 1' visível na patela do lado esquerdo tratou-se de um teste secundário que não será aqui abordado. As referidas patelas começaram por ser limpas com uma rebarbadora de disco negro (Figura 41), de modo a eliminar o maior número possível dos óxidos existentes à superfície, e um líquido solvente denominado Isopropanol (Figura 41), para eliminar o maior número de rugosidades e imperfeições encontrados à superfície das patelas.



Figura 40 – Amostras de teste de GGG50 com cordões singulares de Fe 39.



Figura 41 – Rebarbadora de disco negro (à esq.) e isopropanol, líquido de limpeza das amostras (à dir.).

Após o processo de limpeza das amostras, e sem se recorrer ao pré-aquecimento das mesmas, depositaram-se as 8 linhas apresentadas, sendo que dessas 8 linhas são de realçar 3 linhas que apresentaram resultados aproximados aos resultados ideais no processo de *laser cladding*, segundo as conclusões e avaliações feitas pela ERLAS®, já anteriormente apresentados na secção 4.1 *Testes feitos pela ERLAS®*. Apresentam-se, então, de seguida, através da Figura 42 e das Tabela 14 e Tabela 15, as referidas 3 linhas, os respetivos parâmetros usados, as geometrias obtidas e as taxas de diluição obtidas:

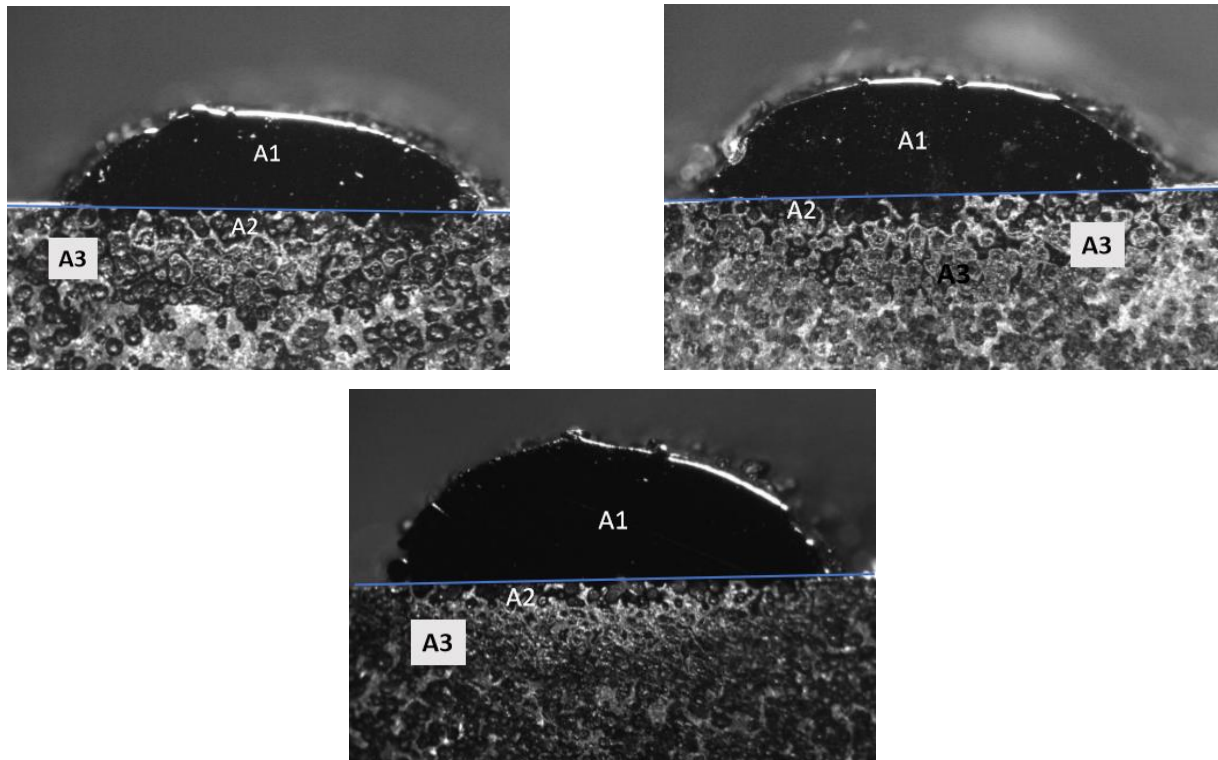


Figura 42 – Cordão 2 (à esq. em cima), cordão 3 (à dir. em cima) e cordão 4 (em baixo) de Fe 39 em GGG50.

Tabela 14 – Parâmetros usados e respetiva taxa de diluição dos cordões de Fe 39 em GGG50

	Potência do <i>laser</i> (W)	Velocidade do processo (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Taxa de diluição (%)
Cordão 2	1000	7	15,50	12
Cordão 3	1000	7	17,55	11
Cordão 4	1000	7	21,45	10

Tabela 15 – Geometrias dos cordões obtidos com Fe 39 em GGG50

	Largura do cordão (mm)	Altura do cordão (mm)
Cordão 2	3,179	0,726
Cordão 3	3,131	0,781
Cordão 4	3,049	1,014

Algumas conclusões rápidas que se podem tirar destes resultados e imagens obtidas são:

- Ainda que todos os 3 cordões apresentados sejam bastante favoráveis, o cordão 4 revelou-se o ideal destas duas amostras, uma vez que apresenta geometrias praticamente idênticas às sugeridas pela ERLAS® (3 mm de largura e 1 mm de altura);
- À medida que se aumenta a taxa de deposição, mantendo a potência *laser* e a velocidade do processo constantes, a taxa de diluição desce ainda que não sejam valores significativos, o que, ainda assim, representam melhorias em termos da ligação material base com material de deposição;
- Os valores de potência de *laser* de 1000 W e a velocidade do processo de 7 mm/s foram mantidos constantes porque nos outros cordões revelaram-se resultados bastante piores com potências de *laser* de 1550 W e 12 mm/s de velocidade do processo;
- Foi constado também, com a ajuda e experiência dos engenheiros e técnicos da empresa, que os ferros fundidos reagem melhor a potências de laser inferiores às usadas para os aços, sendo os valores mais apropriados aqueles que se encontram à volta dos 1000 W. Uma das razões é o facto de os ferros fundidos terem percentagem de carbono maiores que os aços e, por essa razão, permitirem uma melhor fusão dos pós depositados com o material base.

Nas mesmas amostras de ferro fundido GGG50, procedeu-se também a testes com a aplicação de pós de *Inconel* 625. Este diferente pó consiste numa superliga de níquel e também pode ser designado por MetcoClad 625, sendo o seu fornecedor a Oerlikon®. Importante referir que o *Inconel* 625 apresenta uma alta resistência à rutura, à fluência, à fadiga e fadiga térmica, tem ainda excelente soldabilidade, boa resistência à corrosão e oxidação superficial, resistindo em boas condições a ambientes húmidos e salinos. De salientar, ainda, que a sua composição química pode ser observada na Tabela 16, estando os valores discriminados por valores percentuais mássicos (%) (metco 2016):

Tabela 16 – Composição química do *Inconel* 625 (metco 2016)

Cr	Mo	Nb	Fe	Ni
20 - 23	8 - 10	3,15 – 4,15	≤3	Restante

Segundo a Oerlikon®, o *Inconel* 625 (NiCrMo – Figura 43) apresenta uma dureza entre 240 a 280 HV e proporciona baixas diluições, estruturas de grão finas, ausência de fendas e muito baixa porosidade. Ainda é mencionado que com este pó as deposições em várias camadas providenciam bons resultados. Na Figura 43, apresentam-se curvas de fluência do pó. Estas curvas relacionam o esforço/tensão aplicado no pó depositado (pressão, MPa) em função da sua vida até à rutura em horas (metco 2016).

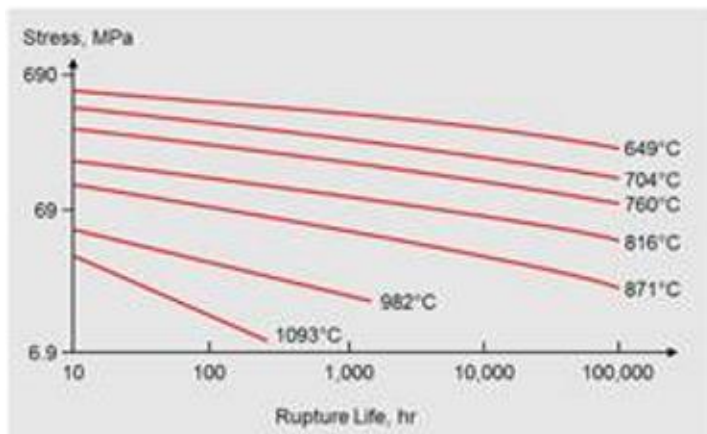


Figura 43 – Curvas de fluência do *Inconel* 625 (à esq.) (metco 2016) e embalagem de pó *Inconel* 625 usado na SERMEC - Wind Power (à dir.).

À semelhança do último teste apresentado, foram depositadas 8 linhas num total de 2 patelas de ferro fundido GGG50 mas, desta vez, com pós de *Inconel* 625. A Figura 44 demonstra exatamente o sucedido. Como no teste anterior, as amostras foram devidamente limpas e não se optou por pré-aquecimento.



Figura 44 – Amostras de teste de GGG50 com cordões singulares de *Inconel* 625.

Mais uma vez, verificaram-se que 3 dessas 8 linhas apresentaram resultados bastante positivos tendo como referência os testes realizados pela ERLAS®. Expõem-se, então, as referidas 3 linhas, os respectivos parâmetros usados, as geometrias obtidas e as taxas de diluição obtidas, na Figura 45 e Tabela 17 e Tabela 18.

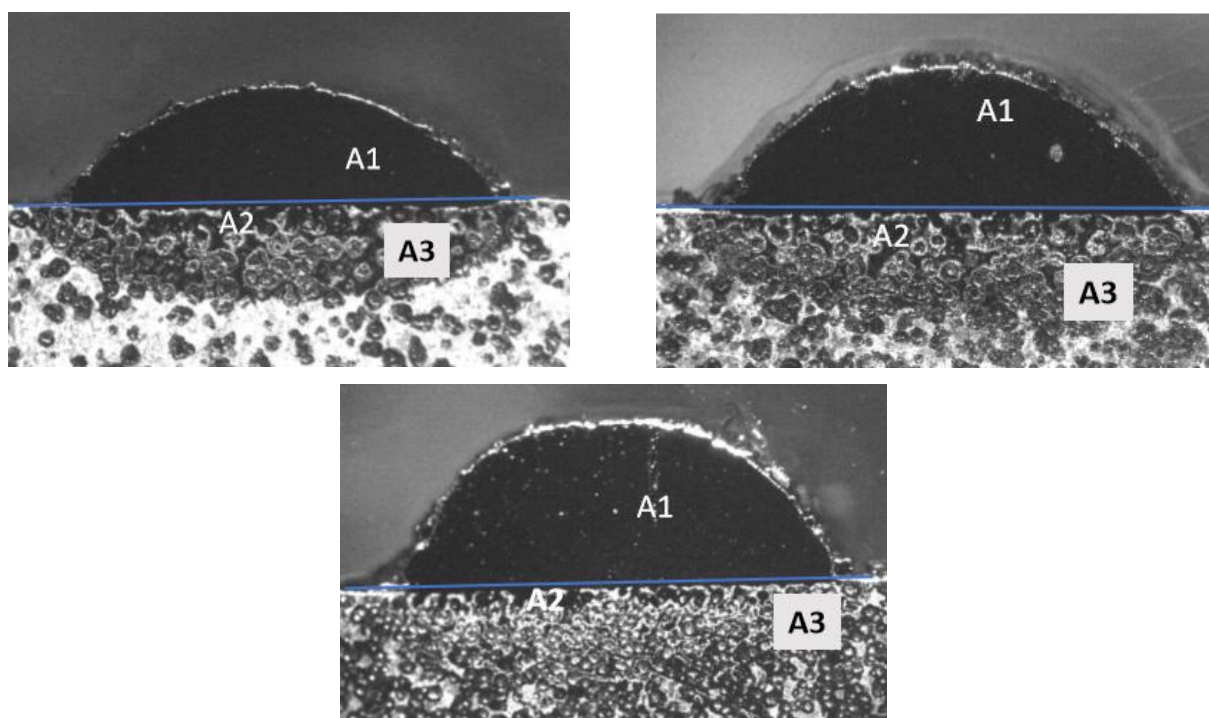


Figura 45 – Cordão B (à esq. em cima), cordão C (à dir. em cima) e cordão D (em baixo) de *Inconel* 625 em GGG50.

Tabela 17 – Parâmetros usados e respectiva taxa de diluição dos cordões de *Inconel* 625 em GGG50

	Potência do laser (W)	Velocidade do processo (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Taxa de diluição (%)
Cordão B	1000	7	15,50	11
Cordão C	1000	7	17,55	6
Cordão D	1000	7	21,45	7

Tabela 18 – Geometrias dos cordões obtidos com *Inconel* 625 em GGG50

	Largura do cordão (mm)	Altura do cordão (mm)
Cordão B	3,104	0,819
Cordão C	3,129	0,966
Cordão D	2,966	1,121

As conclusões a serem tiradas serão muito idênticas às retiradas com os pós de Fe 39 no material base de ferro fundido GGG50, no entanto, neste caso, o cordão que melhor se aproxima do ideal é o cordão C, cordão que resultou na menor diluição e as melhores geometrias. Ainda assim, os cordões C e D seriam ambos aconselháveis.

De seguida, a análise que se apresentará diz respeito aos testes realizados no material base AISI 4337 onde foram aplicados cordões de *Inconel* 625 ou MetcoClad 625, o mesmo material depositado nos testes apresentados atrás. De referir que não serão apresentados a totalidade dos testes realizados, em primeiro lugar por serem um grande número de amostras e de resultados; em segundo lugar porque alguns desses resultados revelaram-se maus, com taxas de diluições iguais ou superior a 20% e com geometrias e secção de cordão inadequadas e, em terceiro e último lugar, porque alguns dos testes realizados não se associam tanto com os materiais usados nos provetes de fadiga do presente projeto.

Assim sendo, o material do substrato analisado desta vez com o *Inconel* 625 foi o AISI 4337, um aço de construção ligado, fornecido em estado tratado. Este é um aço indicado para semi-eixos, veios de torção e flexão, rodas dentadas, sem-fins, parafusos, porcas, pernos, entre outras aplicações. É frequentemente denominado no Grupo SERMEC por VCN 150 -- BOZD devido ao fornecedor Universal Afir – Aços Especiais e Ferramentas, S.A, contudo também é recorrente ser designado por 34 CrNiMo 6 (Universal Afir - Aços Especiais e Ferramentas).

Na Tabela 19 e na Tabela 20 apresenta-se a composição química do material em valores percentuais bem como algumas propriedades mecânicas do material do substrato.

Tabela 19 – Composição química do AISI 4337 (Universal Afir - Aços Especiais e Ferramentas)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Fe
0,34	0,4	0,65	1,5	0,22	1,5	Restante

Tabela 20 – Propriedades mecânicas do AISI 4337 (Aços 2017)

Tensão de ruptura	Tensão limite de elasticidade	Alongamento	Dureza
$\approx 1300 \text{ MPa}$	$\geq 1000 \text{ MPa}$	$\approx 9\%$	240 - 400 HB

Os testes de deposição tiveram exatamente os mesmos pressupostos que os testes apresentados anteriormente, sendo a única exceção que em vez de 4 linhas depositadas por patela foram depositadas 5 linhas com o único propósito de aproveitar o maior espaço útil na patela de material. A Figura 46 ilustra algumas deposições realizadas nas patelas do material AISI 4337.

Figura 46 – Amostras de teste de AISI 4337 com cordões singulares de *Inconel 625*.

De referir que com este material base e material de deposição foram feitas 24 deposições, ou seja, 24 cordões singulares, sendo a Figura 46 apenas ilustrativa de parte dessas deposições. Dado que foram bastantes deposições e como nem todas elas revelaram bons resultados, seguir-se-á a apresentação de imagens relativas a 6 cordões que revelaram resultados bastante positivos tendo como referência os testes realizados pela ERLAS® apresentados previamente neste capítulo. Para além disso, esses resultados positivos também foram fruto da escolha dos parâmetros e as condições da deposição verificadas no momento. Ainda assim, expor-se-ão, para além das referidas 6 linhas com bons resultados, informações relativas aos 24 cordões, como os respetivos parâmetros usados e as taxas de diluição obtidas, através da Figura 47, Figura 48 e Figura 49 e da Tabela 21 e Tabela 22. Para as 6 linhas escolhidas para análise apresentar-se-á adicionalmente as geometrias obtidas nos cordões, bem como algumas conclusões.

Tabela 21 – Parâmetros usados e respectivas taxas de diluição dos 24 cordões de *Inconel 625* sobre *AISI 4337*

	Potência do <i>laser</i> (W)	Velocidade do processo (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Taxa de diluição (%)
Cordão 1	1000	7	17,55	8
Cordão 2	1000	7	19,5	15
Cordão 3	1000	7	21,45	17
Cordão 4	1000	7	23,4	14
Cordão 5	1000	8	17,55	10
Cordão 6	1000	8	19,5	15
Cordão 7	1000	8	21,45	10
Cordão 8	1000	8	23,4	11
Cordão 9	1050	7	17,55	9
Cordão 10	1050	7	19,5	11
Cordão 11	1050	7	21,45	7
Cordão 12	1050	7	23,4	6
Cordão 13	1050	8	17,55	21
Cordão 14	1050	8	19,5	15
Cordão 15	1050	8	21,45	19
Cordão 16	1050	8	23,4	10
Cordão 17	1100	7	17,55	13
Cordão 18	1100	7	19,5	8
Cordão 19	1100	7	21,45	12
Cordão 20	1100	7	23,4	7
Cordão 21	1100	8	17,55	17
Cordão 22	1100	8	19,5	14
Cordão 23	1100	8	21,45	17
Cordão 24	1100	8	23,4	6

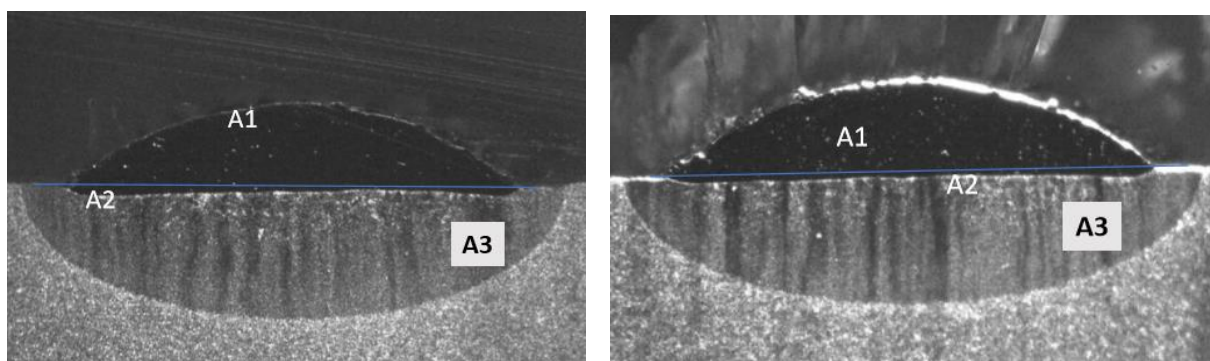


Figura 47 – Cordão 1 (à esq.) e cordão 7 (à dir.) de *Inconel* 625 sobre AISI 4337.

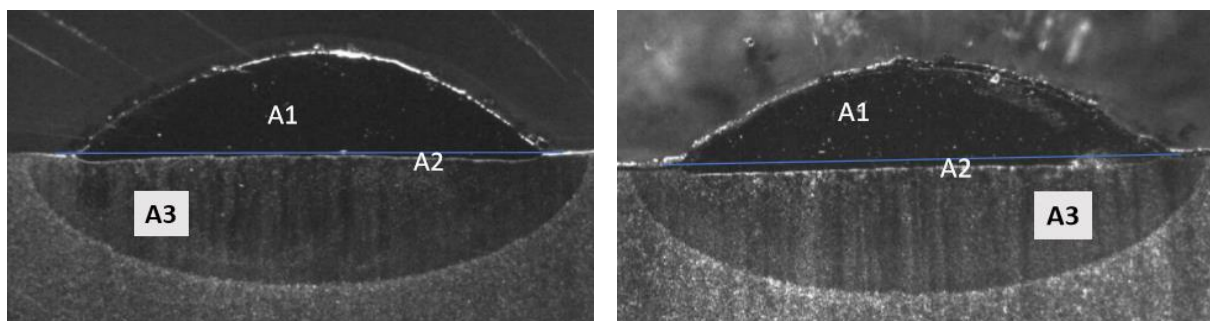


Figura 48 – Cordão 11 (à esq.) e cordão 16 (à dir.) de *Inconel* 625 sobre AISI 4337.

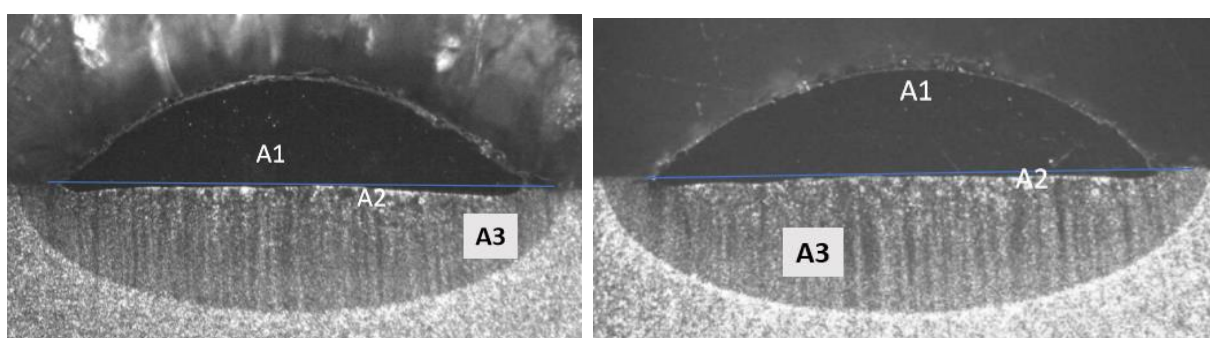


Figura 49 – Cordão 20 (à esq.) e cordão 24 (à dir.) de *Inconel* 625 sobre AISI 4337.

Tabela 22 - Geometrias dos 6 cordões escolhidos obtidos com Inconel 625 sobre AISI 4337

	Largura do cordão (mm)	Altura do cordão (mm)
Cordão 1	3,109	0,565
Cordão 7	3,103	0,585
Cordão 11	3,185	0,678
Cordão 16	3,123	0,605
Cordão 20	3,191	0,721
Cordão 24	3,041	0,643

Algumas conclusões que podem ser retiradas com estes resultados são enumeradas de seguida:

- Facilmente se compreende que pequenas variações na escolha dos parâmetros podem ser suficientes para um resultado bom ou mau de um cordão, fazendo variar a sua taxa de diluição, a sua geometria e a sua aparência. Claro está, esta variação de resultados dada a variação de parâmetros pode ser aliada com a grande sensibilidade do processo e a atmosfera envolvente ao mesmo no momento da deposição;
- Excetuando o cordão 1 dos 6 analisados, verifica-se que cordões que foram sujeitos a taxas de deposições maiores (21,45 g/min e 23,4 g/min) revelaram taxas de diluições menores;
- Relativamente aos 6 cordões analisados, estes apresentaram geometrias praticamente idênticas que, tendo como referência os testes realizados pela ERLAS[®], se revelam positivas, ainda que as alturas dos mesmos se encontrem entre 0,4 – 0,3 mm abaixo do ideal.

Por fim, a última análise que será aqui apresentada consiste num teste realizado no material base de ferro fundido nodular GGG50 em que se procedeu à deposição de multicordões de *Inconel* 625 e Fe39. Esses testes consistiram em multicordões singulares (1 camada) e multicordões de 2 camadas como se pode ver pela Figura 50, em que os multicordões de cima correspondem a 2 camadas e os de baixo a apenas 1 camada.



Figura 50 – GGG50 com multicordões de *Inconel* 625 (à esq.) e Fe39 (à dir.).

De referir que esta análise teve como objetivo observar as consequências da existência de multicordões (pois é deste modo que se pretende depositar os revestimentos nas amostras para os ensaios de fadiga), bem como deposição de mais do que 1 camada. Também se pretende observar a influência de multicordões em camadas de materiais diferentes, neste caso o *Inconel* 625 e o Fe39.

Os 4 testes realizados tiveram todos eles os mesmos parâmetros, apenas se variando o número de camadas depositadas e o material de deposição usado. A Tabela 23 apresenta todos os parâmetros usados e resultados obtidos para cada um dos casos.

Tabela 23 – Parâmetros usados, respectivas taxas de diluição e especificações dos 4 conjuntos de multicordões de *Inconel 625* em GGG50

GGG50	Material de deposição	Potência do laser (W)	Velocidade do processo (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Taxa de diluição (%)	Passo (mm)
1 Camada	<i>Inconel 625</i>	1000	7	21,45	20	1,8
2 Camadas	<i>Inconel 625</i>	1000	7	21,45	13	1,8
1 Camada	Fe 39	1000	7	21,45	41	1,8
2 Camadas	Fe 39	1000	7	21,45	28	1,8

De realçar que a coluna *Passo (mm)* diz respeito ao *offset* entre cada cordão do conjunto, ou seja, entre cada cordão há uma distância aproximada de 1,8 mm. Este valor é o valor recomendado pelo fornecedor, contudo poderiam ter sido escolhidos outros valores, o que iria fazer variar a distância entre cada cordão. A Tabela 24 apresenta as geometrias obtidas para os conjuntos de multicordões retratados acima e a Figura 51 a 54 ilustram os conjuntos de multicordões obtidos.

Tabela 24 – Geometrias obtidas para os conjuntos de multicordões com *Inconel 625* e Fe 39 sobre AISI 4337

GGG50	Material de deposição	Largura do cordão (mm)	Altura do cordão (mm)
1 Camada	<i>Inconel 625</i>	18,849	3,026
2 Camadas	<i>Inconel 625</i>	18,797	6,579
1 Camada	Fe 39	18,835	1,974
2 Camadas	Fe 39	18,919	3,421



Figura 51 – Multicordões de 1 camada de *Inconel 625* em GGG50.

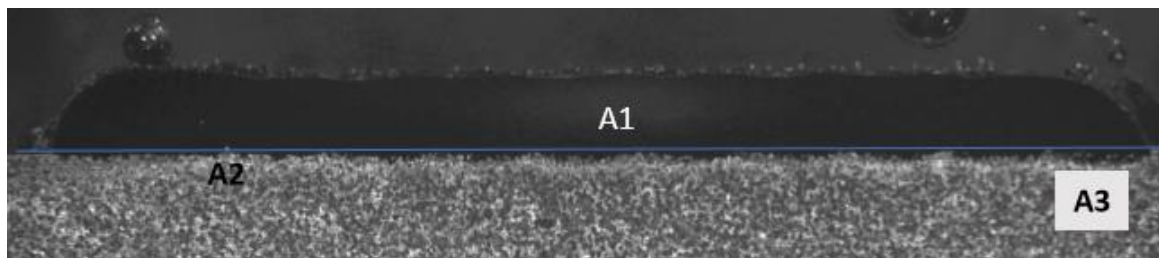


Figura 52 – Multicordões de 1 camada de *Inconel* 625 em GGG50.

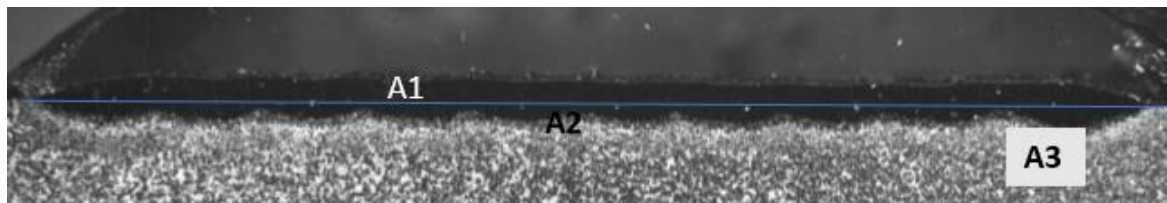


Figura 53 – Multicordões de 1 camada de Fe 39 em GGG50.

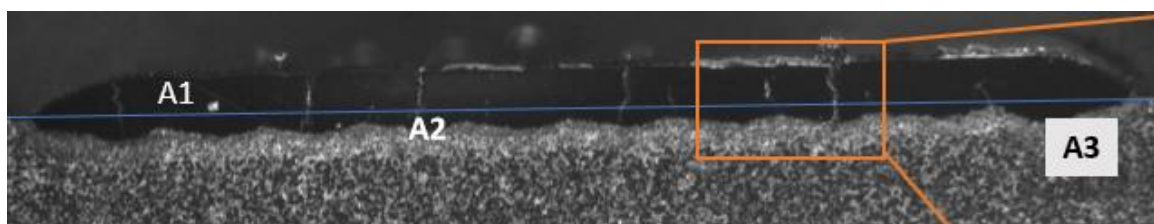


Figura 54 – Multicordões de 2 camadas de Fe 39 em GGG50. Verificação de alguns problemas consequentes das deposições.

A análise dos resultados relativos às deposições em multicordões com 1 e 2 camadas de *Inconel* 625 e Fe 39 sobre ferro fundido nodular GGG50 possibilita as seguintes conclusões:

- Verifica-se com clareza que o material de deposição *Inconel* 625 resultou em deposições de melhor qualidade nas quais foram visíveis menos poros e poros menores (Figura 55), ao mesmo tempo que a existência de fendas foi praticamente nula bem como as diluições existentes reduzidas, ainda que não sejam de todo perfeitas.
- Em contrapartida ao referido em cima, verificou-se que o material de deposição Fe 39 revelou a existência de poros e poros grandes (Figura 56), aliando a isto a grande facilidade de criação de fendas principalmente aquando da deposição de multicordões em 2 camadas (Figura 54 e Figura 57) e diluições superiores às verificadas para o *Inconel* 625, principalmente aquando da deposição de multicordões em 1 camada;
- Portanto, o *Inconel* 625 depositado em multicordões de 1 ou 2 camadas constatou-se preferível em comparação com o Fe 39 depositado nas mesmas condições, pois obtiveram-se deposições de bastante melhor qualidade.

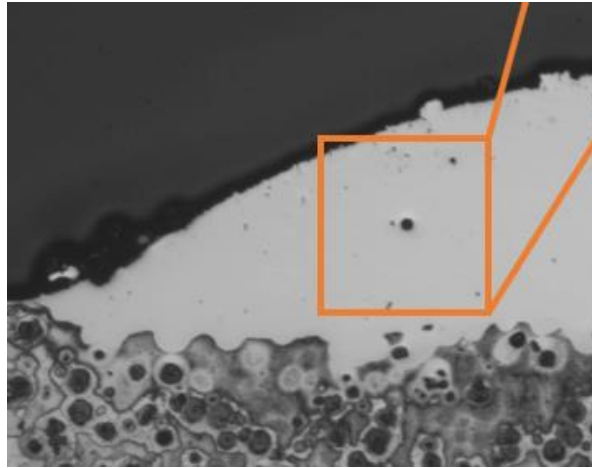


Figura 55 – Poro pequeno nos multicordões de 1 camada de *Inconel 625* sobre GGG50.

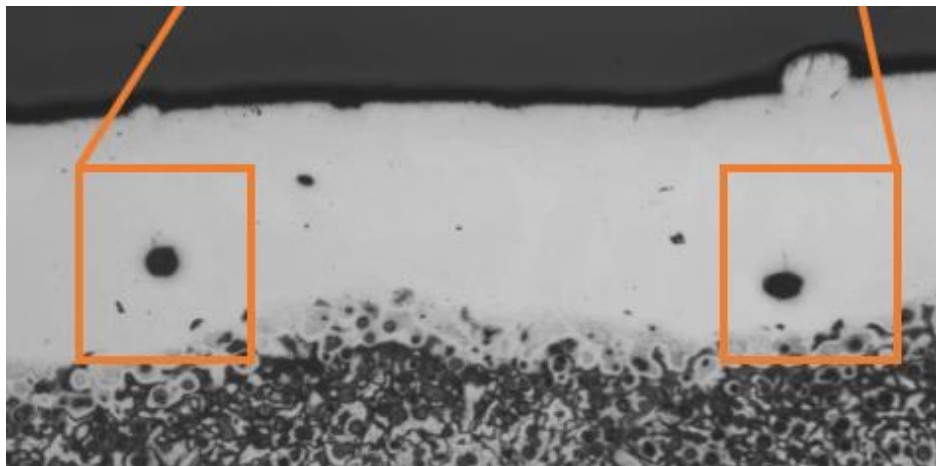


Figura 56 – Poros grandes nos multicordões de 1 camada de Fe 39 sobre GGG50.

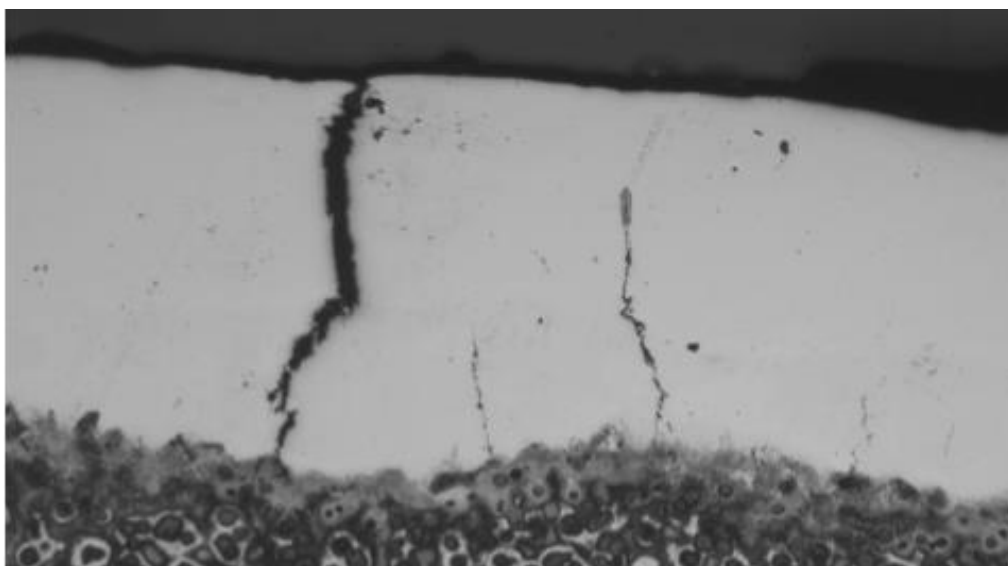


Figura 57 – Fendas nos multicordões de 2 camadas de Fe 39 sobre GGG50.

Após a análise mais detalhada dos testes preliminares realizados, que tinham como objetivo permitir escolher os parâmetros mais indicados a serem usados nas deposições dos provetes finais de fadiga, resta apenas informar o leitor que na totalidade foram realizados cerca de 20 testes preliminares diferentes, incluindo os 4 acima apresentados, que envolveu não só os materiais base AISI 4337, 42 CrNiMoV4 e GGG 50 como também os materiais de deposição *Inconel* 625, *Inconel* 718, Metco 42C e o Fe 39. Nem todos foram apresentados porque, como já mencionado atrás, em alguns deles obtiveram-se resultados maus que permitiram de todo descartar alguns tipos de parâmetros para as deposições finais, como por exemplo potências de *laser* elevadas superiores a 1400W e velocidades do processo superiores a 10 mm/s. Para além disso, em alguns desses testes testou-se a exequibilidade de um pré-aquecimento momentos antes das deposições, na ordem dos 150-300°C. Ora, com a ajuda dos engenheiros e técnicos da empresa onde os testes foram realizados e com a verificação contínua dos efeitos desse pré-aquecimento nas amostras testadas, constatou-se que esse fenómeno apenas traz como vantagem, na maioria dos casos, tornar a zona termicamente afetada (ZTA) mais homogênea (Figura 58) e com variações menos bruscas entre o material base, a ZTA e o material depositado. Como segunda consequência, esse pré-aquecimento tinha como efeito o alívio premeditado de tensões residuais provenientes dos revestimentos provocados pela máquina de *laser cladding*.

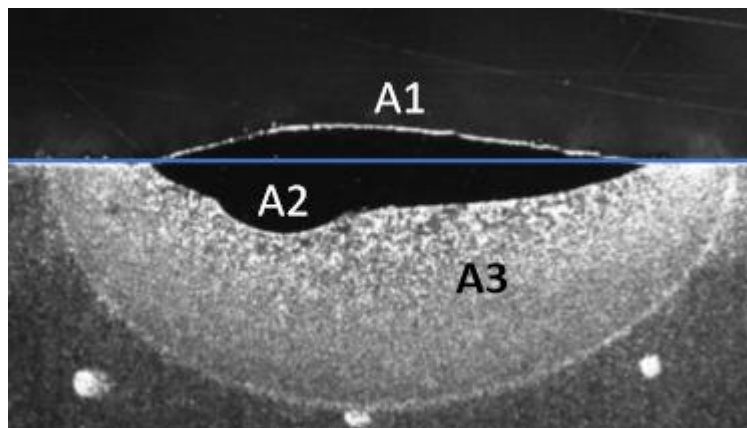


Figura 58 – Exemplo de um cordão de *Inconel* 625 sobre AISI 4337 que sofreu um pré-aquecimento entre 150-200°C, onde se verifica uma ZTA mais homogênea que os exemplos anteriores, contudo o resultado do cordão é mau, apresentando dimensões fracas (altura $\approx 0,22$ mm) e diluições na casa dos 60%.

No entanto, a existência de pré-aquecimento revelou resultados maus de uma maneira contínua, principalmente em termos de diluições elevadas ($\geq 30\%$) e geometrias e dimensões de cordão fora do indicado, como visto no subcapítulo 4.1 *Testes feitos pela ERLAS®*, pelo que todos os testes apresentados atrás e que permitiram escolher os parâmetros mais indicados não sofreram qualquer tipo de aquecimento prévio às deposições.

Finalizando este subcapítulo, informa-se que os parâmetros escolhidos que foram utilizados para as deposições finais dos provetes de fadiga serão expostos no subcapítulo seguinte, bem como todo o processo envolvido nas deposições dos mesmos provetes.

4.3 Deposições nos provetes

Esta secção consiste em descrever o mais pormenorizado possível o processo de deposição dos provetes finais para os ensaios de fadiga, onde se pretende relatar a escolha dos parâmetros mais indicados às deposições com base nos testes descritos nos subcapítulos anteriores, bem como apresentar todos os detalhes envolvidos nas deposições das referidas amostras.

Em primeiro lugar, é importante apresentar os parâmetros escolhidos para as deposições, bem como os argumentos que levaram à sua escolha e, ainda, o método definido ou o plano definido em todo o processo. Assim, de maneira introdutória e como pode ser visto na Tabela 25, resumem-se os parâmetros que resultaram nas deposições com melhores características:

Tabela 25 – Informações relativas às deposições com melhores propriedades

	Quantidade de provetes	Material de deposição	Potência do laser (W)	Velocidade do processo (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Passo (mm)
GGG70	5	<i>Inconel</i> 625	1000	7	17,55	1,8
18 CrNiMo 7-6	5	<i>Inconel</i> 625	1000	7	17,55	1,8
GGG70	5	<i>Inconel</i> 625	1100	8	23,4	1,8
18 CrNiMo 7-6	5	<i>Inconel</i> 625	1100	8	23,4	1,8

Tendo em conta o resumo da Tabela 25 estabeleceram-se as seguintes diretrizes para os provetes a usar nos ensaios de fadiga:

- Ficou definido a realização de 2 conjuntos de 5 provetes cada com substrato de aço e dois conjuntos de 5 provetes cada de substrato em ferro fundido, contabilizando no total 20 provetes, com parâmetros diferentes por conjunto, de modo a testar as diferenças nas resistências à fadiga entre diferentes substratos, como também para os mesmos substratos, diferenças entre parâmetros de deposição;
- Dada a largura da ranhura/caixa realizada em todos os provetes ser de 25 mm de largura, usando um passo de 1,8 mm para os cordões, serão depositadas 13 linhas singulares (1 camada) no comprimento da ranhura (≈ 100 mm) com vista a não se depositar para além da largura da ranhura criada e para além da espessura do provete;
- Não foi considerada o uso de pré-aquecimento nas deposições nem processo de pós alívio de tensões, como já explicado no subcapítulo anterior;
- O único material de deposição utilizado foi o *Inconel* 625.

Como se pode ver pela Tabela 25, apenas se considerou o material de deposição *Inconel 625*. Esta decisão teve em conta o facto deste pó de deposição, na sua generalidade e em comparação com outros pós testados, ser aquele com melhores resultados obtidos, tendo em conta que proporciona cordões com menos facilidade de criação de fendas, existência de poros de pequena dimensão quando existentes, dimensões próximas dos ideais recomendados pela ERLAS[®], diluições na sua maioria entre valores aconselháveis (5-20%) e boa capacidade de fusão com diferentes tipos de materiais base. Todos estes fatores revelaram-se ser os melhores aquando do uso do *Inconel 625*, em comparação com outros materiais testados como o Fe 39 e o Metco 42C.

Relativamente aos parâmetros escolhidos, estes baseiam-se na sua maioria nos testes feitos previamente (apresentados na secção 4.1), mas também na experiência e opinião dos engenheiro e técnicos da empresa parceira da dissertação. Assim sendo, e de uma maneira sucinta, os parâmetros escolhidos (mostrados na Tabela 25) tiveram na sua escolha os fatores principais de permitir obter cordões de geometrias próximas das indicadas, tanto em ferros fundidos como em aços, ao mesmo tempo que proporcionavam diluições interessantes. Na prática, para o primeiro conjunto de parâmetros, tanto para os ferros fundidos como para os aços testados, as diluições andavam entre 6-8% e as alturas dos cordões estavam compreendidas entre os 0,560 mm e os 0,970 mm. No que diz respeito ao segundo conjunto de parâmetros, e ainda que este só tenha sido testado para aços, prevê-se que os valores das diluições na sua generalidade estejam entre os 6-10% e as alturas dos cordões com valores mínimos de 0,650 mm.

Após esta análise e decisão sobre os parâmetros a serem usados, partiu-se para as deposições propriamente ditas dos provetes. De seguida, explicar-se-á como se procedeu às deposições na empresa parceira.

Inicialmente, e como acontece em todos os testes realizados na máquina de *laser cladding*, o primeiro passo é sempre a calibração da máquina e os ajustes respetivos do teste que se vai fazer como o alinhamento dos eixos (Figura 59).



Figura 59 – Duas perspetivas de alinhamento dos eixos da máquina.

Seguidamente, tal como em todos os testes realizados, é necessário encher a panela de pó do transportador de pó com o material desejado, neste caso seria o *Inconel 625*, como demonstra na Figura 60. É importante encher a panela de pó com mais material do que o necessário, uma vez que o desde o transportador de pó até à deposição em si, o pó precisa de percorrer um percurso e todos esses canais precisam de estar preenchidos com o material a ser depositado na peça.



Figura 60 – Enchimento da panela de pó com *Inconel 625*.

Por fim, antes de iniciar a deposição, estabeleceu-se o local onde o provete estaria assente, bem como a colocação dos parâmetros e condições necessárias ao enchimento da ranhura da referida amostra no programa da máquina. A Figura 61, ilustra as condições nas quais os provetes foram revestidos (preenchimento da caixa maquinada) onde se deve realçar que o material colocado por baixo da amostra tem o efeito de arrefecimento mais homogêneo da peça, para evitar danos na superfície de apoio do provete, pois este apresenta uma espessura muito reduzida o que se previa atempadamente que causaria danos na superfície referida, dados os parâmetros e gradientes de temperatura envolventes neste processo.



Figura 61 – Condição inicial de deposição dos provetes.

Preparados todos os requisitos de pré-deposição, realizaram-se as deposições dos 20 provetes, fazendo variar apenas os parâmetros de um conjunto de 10 provetes para os outros 10 provetes, segundo os parâmetros apresentados em cima. A Figura 62 mostra um exemplo de um provete de cada material: ferro fundido e aço.

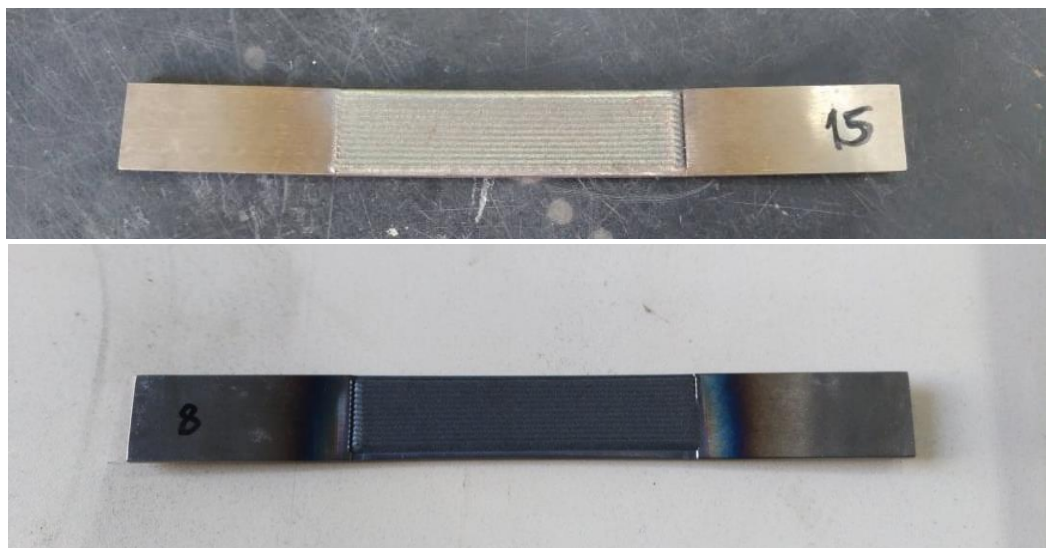


Figura 62 – Provede de ferro fundido (em cima) e provede de aço (em baixo) depositados.

De referir pela figura de cima que os números nos provetes se referem à identificação definida para o conjunto. Os provetes 1 a 5 e 11 a 15 usam como substrato o ferro fundido variando apenas os parâmetros, e os provetes 6 a 10 e 16 a 20 tratam-se dos provetes com substrato em aço. Consultar a Tabela 25 para relembrar os parâmetros de cada um dos conjuntos.

Também se revela importante informar que ambos os materiais e conjuntos empenaram aquando das deposições. A razão que se encontra para tal deve-se à razão entre espessura do provete, o gradiente de temperaturas existentes e deposições apenas numa face dos provetes. A espessura dos provetes estava na casa dos 5 mm e a temperatura alcançada no momento da deposição está na casa dos 600-800 °C. Assim, deu-se o empeno dos provetes pela elevada quantidade de tensões residuais e deformações impostas numa geometria limitada. Contudo, é de notar que o empeno e cor na zona de deposição dos provetes varia de material para material e, neste caso, verificou-se um empeno maior nos ferros fundidos do que nos aços e uma cor mais acastanhada na zona de deposição dos ferros fundidos e uma cor azulada/esverdeada na zona de deposição dos aços. Já na Figura 62 se verifica a questão das cores, contudo na Figura 63 dá-se mais ênfase ao empeno criado, neste caso no aço.



Figura 63 – Exemplo do empeno criado nos provetes de aço.

4.4 Ensaios de fadiga

Como se apresentou atrás, foram depositados um total de 20 provetes: 10 provetes de aço com um conjunto de 5 provetes depositado com um certo conjunto de parâmetros e os outros 5 provetes com outros parâmetros anteriormente definidos. Aconteceu o mesmo para os 10 provetes de ferro fundido, pelo que esses 20 provetes foram testados à fadiga.

Os ensaios de fadiga foram realizados em controlo de deslocamento mantendo-se constante em todos os ensaios a gama de deslocamentos. As tensões aplicadas foram determinadas com base nos esforços medidos em células de carga que servem de apoio do provete. Procurou-se realizar os ensaios com uma razão de tensões positiva na gama 0,3-0,4, valor este que não foi possível manter constante por razões relacionadas com a variabilidade na rigidez e geometria/tolerâncias dos provetes. A definição do número de ciclos de rutura foi realizada com base na análise da evolução das cargas ao longo do ensaio, tendo sido para o efeito sido realizadas aquisições periódicas das cargas.

Tal como referido atrás, por cada ficheiro de aquisição de dados são registados resultados de 2087 pontos. Assim, de modo a otimizar o processamento de dados, foi obtido o tempo máximo de cada ficheiro estudado, o valor máximo da força nesse ficheiro, o valor mínimo da força, o ΔF e a média entre a força máxima e mínima.

Uma vez que os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, foi necessário definido um critério de rutura dos provetes. Esse critério consistiu em assumir a rutura quando se observou uma redução de 10% da tensão máxima do ensaio (critério N10). Importante referir que a tensão associada a cada força foi calculada através da seguinte equação simplificada:

$$\sigma = \frac{3}{2} \times \frac{PL}{b \times h^2} \quad (3)$$

em que:

- P pode ser a $F_{\text{máx}}$, a F_{min} ou o ΔF , consoante a tensão que se pretende calcular;
- L é o comprimento do provete entre apoios;
- b é a largura do provete;
- h é a espessura do provete.

O número de ciclos associado à rutura do provete, ou seja, o número de ciclos de vida do provete, foi calculado multiplicando ao tempo de ensaio de cada provete a frequência dos ensaios de fadiga, que foi igual a 23 Hz. Já o tempo de ensaio pode ser calculado aproximadamente através dos ficheiros registados pela seguinte equação:

$$T = 0,43 \times NFA + 150 \times NFA \quad (4)$$

em que T é o tempo do ensaio em segundos e NFA é o número do ficheiro de aquisição de dados.

A Tabela 26 sintetiza todos os resultados obtidos para os 20 provetes.

Tabela 26 – Resultados sintetizados dos ensaios de fadiga nos 20 provetes

	Material	Local de fratura	Tempo de rotura (s)	ΔF (N)	$\Delta \sigma$ (MPa)	Razão de tensões, R	Nº ciclos (Hz)
Provete 1	Ferro Fundido	Centro	17697	896	473	0,391	408503
Provete 2	Ferro Fundido	Interface	10912	875	462	0,369	251875
Provete 3	Ferro Fundido	Fraturou no processo de desempenho					
Provete 4	Ferro Fundido	Centro	7754	869	459	0,371	178981
Provete 5	Ferro Fundido	Centro	15565	913	482	0,409	359300
Provete 6	Aço	Centro	13892	854	451	0,368	320677
Provete 7	Aço	Centro	11924	892	471	0,428	275251
Provete 8	Aço	Centro	14595	860	454	0,443	336909
Provete 9	Aço	Centro	12248	865	456	0,423	282727
Provete 10	Aço	Centro	14043	858	453	0,382	324168
Provete 11	Ferro Fundido	Centro	9586	912	481	0,370	221284
Provete 12	Ferro Fundido	Interface	Resultados dispersantes e inconclusivos				
Provete 13	Ferro Fundido	Centro	9973	942	497	0,337	230205
Provete 14	Ferro Fundido	Centro	10483	850	449	0,293	241971
Provete 15	Ferro Fundido	Interface	4383	926	489	0,350	101176
Provete 16	Aço	Centro	26627	766	405	0,195	614640
Provete 17	Aço	Interface	14726	856	452	0,334	339925
Provete 18	Aço	Centro	15395	793	419	0,254	355360
Provete 19	Aço	Interface	11458	850	449	0,309	264486
Provete 20	Aço	Interface	10026	882	465	0,347	231440

As Figura 64 e Figura 65 que se seguem apresentam os resultados dos ensaios de fadiga que foram resumidos na Tabela 26. De notar que apesar de se ter aplicado em todos os provetes a mesma gama de deslocamentos, a gama de tensões resultante não foi a mesma em virtude de diferenças na geometria dos provetes resultantes da deposição e do empeno/desempeno dos provetes. No entanto, os valores reais das tensões foram quantificados com base nas forças medidas nos apoios dos provetes e apresentados nos diagramas S-N. A análise dos resultados para o substrato de aço mostra a possibilidade de uma correlação dos resultados através de uma regressão linear. Já no caso dos provetes em ferro fundido, tal correlação não foi possível em virtude de uma maior dispersão de resultados.

Também importa referir que apesar da flexão em três pontos concentrar as tensões no centro dos provetes, alguns ensaios tiveram roturas na zona de transição entre a caixa maquinada no provete e a secção nominal do mesmo. Esta situação ocorreu, pois, o material depositado não preencheu a caixa na sua plenitude. Esses resultados anómalos foram devidamente assinalados na tabela resumo dos resultados, embora nestes casos também se optou por apresentar os mesmos resultados no diagrama S-N com base na tensão na secção central. Com efeito, a tensão na zona de transição da caixa não corresponde à tensão na secção central, mas o entalhe aí presente provoca um agravamento dessas tensões.

Os resultados experimentais em bruto, em particular, os diagramas tensão-ciclos estão apresentados no ANEXO B para cada um dos provetes testados. Com base nestes diagramas e aplicando o critério N10 (10% de redução da tensão) determinaram-se o número de ciclos de rotura.

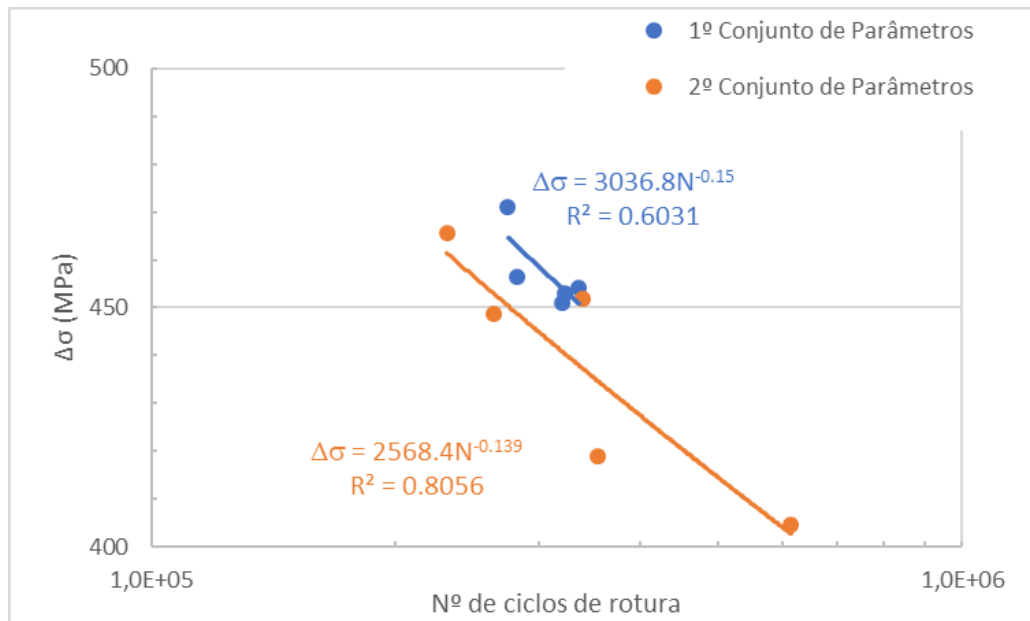


Figura 64 – Resultados dos provetes de aço.

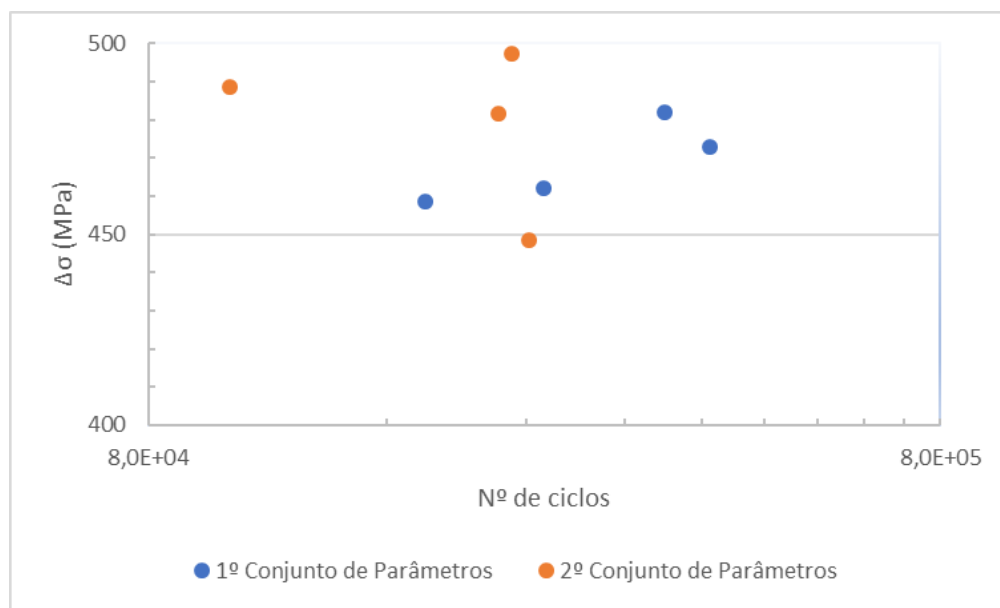


Figura 65 – Resultados dos provetes de ferro fundido.

Algumas conclusões que se podem retirar com a observação da Figura 64 são as seguintes:

- Os dados do aço do 1º conjunto (Série azul) são muito semelhantes. Estes apresentam um valor médio da tensão na casa dos 460 MPa e um número de ciclos médio na casa dos 308000 ciclos;
- Em relação ao 2º conjunto de parâmetros de deposição usados nos substratos de aço, a gama de tensão média rondou os 445 MPa (valor semelhante ao 1º conjunto de parâmetros) e o número de ciclos de rotura foi aproximadamente de 298000 ciclos;

- Relativamente ao local da fratura, de notar que apenas no 2º conjunto de parâmetros se registaram fraturas na zona da interface entre cordão e ranhura.
- O 1º conjunto de parâmetros de deposição apresenta uma resistência à fadiga superior à resistência do 2º conjunto de parâmetros de deposição.

No que diz respeito à Figura 65, de salientar alguns aspetos observáveis associados aos provetes de ferro fundido:

- Em comparação com os aços, observa-se claramente uma diferença no número de ciclos que é muito inferior, mas com tensões médias mais elevadas;
- O local da fratura nos provetes de ferro fundido não parece ter muita relação com os parâmetros porque é relativamente semelhante para os dois conjuntos;
- No 1º conjunto de parâmetros verifica-se que para uma gama de tensão média na casa dos 470 MPa resultou aproximadamente 300000 ciclos de vida de fadiga, mas com resultados muito dispersos;
- No 2º conjunto de parâmetros, as tensões médias são aproximadamente 480 MPa e o número de ciclos de rotura foi aproximadamente de 200000, sendo estes menos dispersos;

De notar que as razões de tensões são praticamente semelhantes em todos os ensaios, contudo para o aço no 1º conjunto de parâmetros a razão é de 0,41 e 2º conjunto de parâmetros apenas atinge os 0,3. Já nos provetes de ferro fundido, no 1º conjunto de parâmetros obteve-se 0,4 e no 2º conjunto de parâmetros 0,3. Estes valores de razões de tensões não são totalmente controlados nos ensaios pois resultam de alguma incerteza na geometria dos provetes, em particular após o processo de deposição e desempenho. Não foram aplicados tratamentos pós desempenho nem operações adicionais de maquinagem.

De modo a compreender qual o efeito visual das roturas por fadiga, as seguintes figuras apresentam os provetes após ensaio, onde se pode observar a localização das fendas de fadiga. De um modo geral pode constatar-se dois tipos de rotura: rotura na zona central (desejada/maioria) e rotura na zona de transição entre material depositado e secção nominal do provete (indesejada/minoria). Também se pode constatar que o preenchimento da caixa maquinada não foi perfeito. No futuro será necessário garantir o preenchimento da caixa em todo o seu comprimento e largura, assim como aplicar duas camadas sobrepostas para posterior retificação da superfície.



Figura 66 – Fenda central do provete de ferro fundido 1

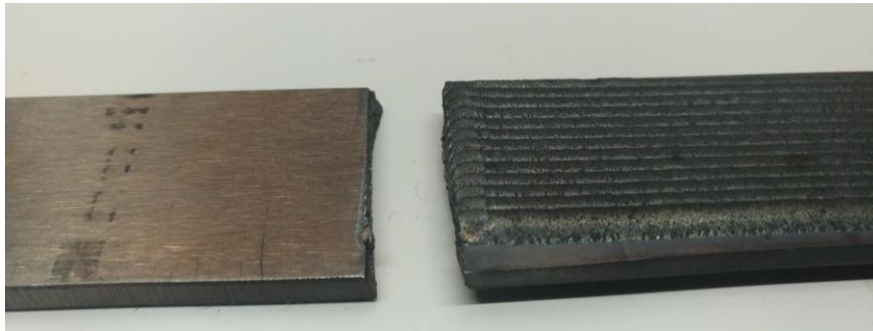


Figura 67 – Fenda na interface do provete de ferro fundido 2.

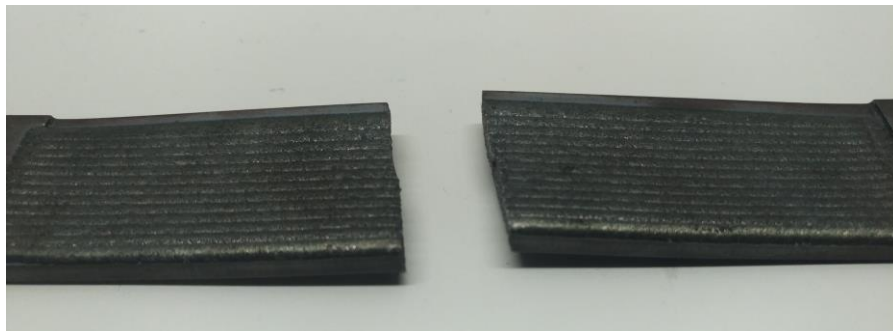


Figura 68 – Fenda central ocorrida no desempenho do provete de ferro fundido 3.



Figura 69 - Fenda central do provete de ferro fundido 4.



Figura 70 – Fenda central do provete de ferro fundido 5.



Figura 71 – Fenda central do provete de aço 6.



Figura 72 – Fenda central do provete de aço 7.



Figura 73 – Fenda central do provete de aço 8.



Figura 74 – Fenda central do provete de aço 9.



Figura 75 – Fenda central do provete de aço 10.



Figura 76 – Fenda central do provete de ferro fundido 11.



Figura 77 – Fenda central do provete de ferro fundido 13.

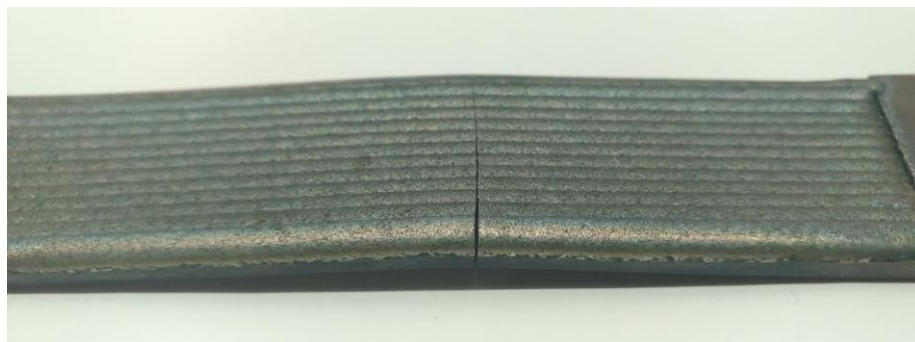


Figura 78 – Fenda central do provete de ferro fundido 14.

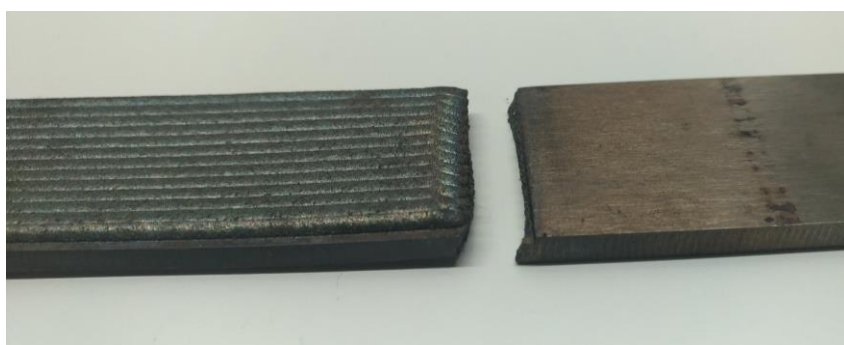


Figura 79 – Fenda na interface do provete de ferro fundido 15.



Figura 80 – Fenda central do provete de aço 16.



Figura 81 – Fenda na interface do provete de aço 17.



Figura 82 – Fenda central do provete de aço 18.



Figura 83 – Fenda na interface do provete de aço 19.

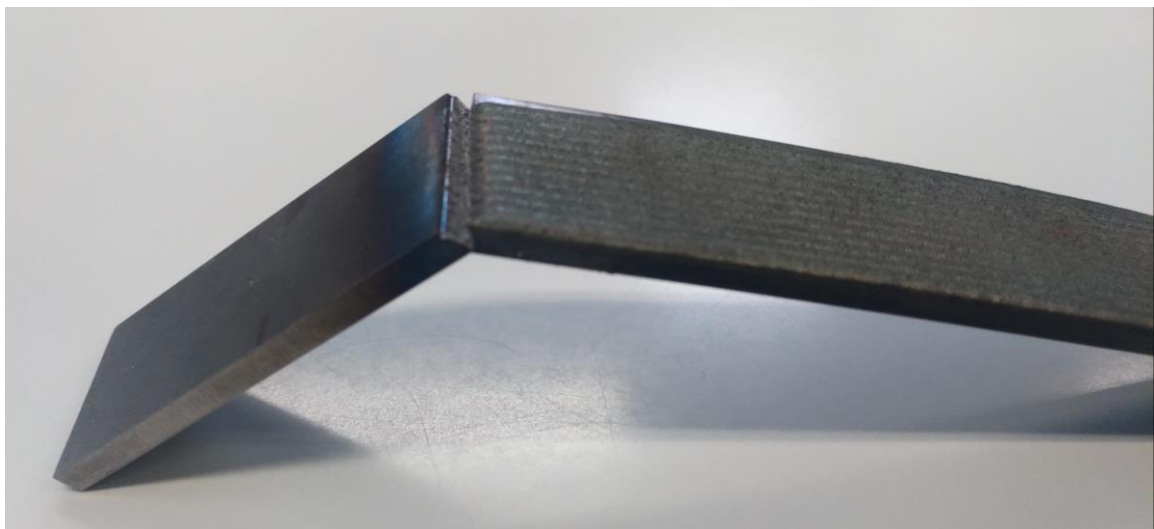


Figura 84 – Fenda na interface do provete de aço 20.

Apresentados todos os resultados dos ensaios de fadiga nos provetes de aço e ferro fundido, podem ser retiradas várias conclusões relacionadas com o processo de *laser cladding* e os parâmetros de operação do mesmo tendo em conta os seus efeitos em termos de fadiga:

- Em primeiro lugar, dado as potências envolvidas neste processo é recomendável a sua aplicação em materiais e/ou amostras com espessuras mais elevadas que as apresentadas nos provetes deste presente trabalho, pois, como se pode constatar, o uso de espessuras reduzidas (≈ 5 mm) provocou o empenamento das amostras aquando do processo de deposição, ainda que as potências utilizadas sejam consideradas reduzidas para o revestimento a *laser* (≈ 1000 W). Ora, a consequência do empenamento nos provetes causou o aumento as tensões residuais existentes nos provetes, que de certo modo contribui para a redução da resistência à fadiga por tensões de tração elevadas. O desempenho dos provetes pode inverter o sentido das tensões residuais na superfície dos provetes para tensões negativas benéficas à fadiga. Assim surge alguma incerteza na extensão e intensidade das tensões residuais. Futuramente será importante um tratamento térmico após desempenho dos provetes para a remoção das tensões residuais e recuperação de estruturas dos materiais não deformadas;
- Outro aspeto importante a relatar é o facto de certos provetes terem fraturado na interface entre os cordões depositados e o material base. A principal razão para este acontecimento deve-se aos requisitos previamente seleccionados no programa de deposição. O ideal teria sido aumentar o comprimento do cordão depositado, de modo a que estes comesçassem e terminassem com uma folga no material depositado para assegurar a fratura de todos os provetes na zona central da deposição, uma vez que, desta maneira todos os provetes poderiam ser comprados nas mesmas condições. Ainda de referir, que o uso de retificação ou outro tipo de processamento pós-deposição seria uma mais-valia para a análise dos provetes, pois tornaria todas as amostras nas mesmas condições de ensaio.
- De salientar que não foram verificadas diferenças significativas nas tensões médias de rotura e no número de ciclos na fratura em comparação entre aço e ferro fundido. Contudo, nos provetes de ferro fundido observa-se facilmente uma maior disparidade/dispersão de resultados ao invés que nos provetes de aço que apresentaram resultados muito idênticos a rondarem praticamente todos os mesmos resultados, à exceção de um ou outro teste que saiu fora da normalidade observada. Pode-se concluir, então, que o aço se comporta de uma maneira mais constante e homogênea a ensaios de fadiga ao contrário do ferro fundido. Sabe-se de antemão que o ferro fundido apresenta uma ductilidade baixa, dado a sua tensão limite elástica praticamente idêntica à tensão de rotura, o que é um fator de desequilíbrio no comportamento à fadiga dos ferros fundidos. Ou seja, quando se pretender uma aplicação que esteja sujeita a cargas flutuantes e permanentes, o uso de aços em contrapartida com o uso de ferros fundidos é preferível.

- Em termos da variação dos parâmetros nos diferentes ensaios, os resultados obtidos não permitem obter conclusões concretas dessa variação na influência na fadiga dos materiais estudados. É importante notar que a diferença entre conjunto de parâmetros é, de facto, reduzida, contudo este estudo restringiu-se a parâmetros na casa dos estudados, pois parâmetros com valores mais reduzidos não foram comprovados na literatura serem recomendados ou aconselhados e, parâmetros com valores mais elevados, previam, por um lado, maiores empenamentos e enfraquecimentos das amostras (dada a espessura reduzidas das mesmas); por outro lado resultados mais inconstantes dada a geometria dos provetes, tendo como referência os testes preliminares realizados antes das deposições, testes esses que permitiram a seleção dos parâmetros de deposição, materiais de deposição a serem usados e, no fundo, servirem como base e referência de análise aos resultados finais obtidos. Ora, a variação entre esses parâmetros não permite uma conclusão sólida da influência dos mesmos no comportamento à fadiga dos aços e ferros fundidos, no entanto no caso dos aços foi possível observar um melhor comportamento do 1º conjunto de parâmetros que se traduzem em potências de *laser*, velocidades de avanço do processo e taxas de deposição dos pós mais reduzidas que o 2º conjunto de parâmetros de deposição;
- Comprovou-se, claramente, que o processo de *laser cladding* fragiliza os materiais, no que diz respeito ao seu comportamento à fadiga, no entanto esse enfraquecimento revela-se menos acentuado do que processos de revestimento convencionais. Ainda que exista uma grande sensibilidade neste processo de revestimento, especialmente na quantidade de variáveis influentes na pré-operação, quando se revela a necessidade de reparação, manutenção ou reparo de peças de grande dimensão, o *laser cladding* responde a muitas das necessidades requeridas e, assim, o comportamento à fadiga da peça a ser reparada é assegurado, ainda que sofra alguns enfraquecimentos em relação à peça original e fabricada através de um só processo, por exemplo fundição ou maquinagem.

5. Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

Terminado este projeto são de salientar um conjunto de informações que no final do mesmo são claramente importantes revelar. Por um lado, de modo a extrair maior conhecimento científico acerca do processo envolvente na presente dissertação, mas também do ponto de vista industrial, empresarial e vanguardista da indústria metalúrgica e dos processos de fabrico. Dada a parceria existente entre a FEUP e a SERMEC Group no decorrer desta dissertação de mestrado, foram experienciados dois meios de desenvolvimento da Engenharia.

Em primeiro lugar, a experiência adquirada na SERMEC Group permitiu uma aproximação à realidade do mercado de trabalho industrial, na qual foi possível estar ocorrente das necessidades e requisitos dos clientes, do contacto com outras entidades e, principalmente, todo um trabalho de desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias de fabrico. Em especial, ficou significativa ciente que o processo de fabrico *laser cladding* é uma tecnologia emergente e vanguardista, capaz de responder a várias necessidades atuais e de futuro, como a reparação e remodelação de estruturas de grande precisão e de elevadas dimensões bem como, a reestruturação de variadas formas complexas de materiais. Trata-se de um processo do presente e do futuro com muitas variáveis de estudo e que, ainda, tem algumas batalhas a travar com os processos de fabrico convencionais e de certo modo concorrentes, nomeadamente no combate com o elevado investimento inicial no que diz respeito ao tipo de maquinaria e programação de alta performance necessárias para o correto desenvolvimento do mesmo. Detalhando o trabalho desenvolvido neste relatório, é de concluir que a área de domínio dos parâmetros de operação exige, ainda, uma constante experimentação dos referidos parâmetros em amostras de teste, pois revelou-se a solução mais prática e acessível de modo a averiguar a influência dos mesmos, singular e conjuntamente, no comportamento dos materiais base ou materiais de substrato a todo o tipo de solicitação e atmosfera. Uma vez observada e experienciada a grande sensibilidade deste processo, foi concluído também que a mínima variação dos parâmetros ou condição exterior faz alterar, com grande probabilidade, o resultado final das deposições, sejam elas de um modo positivo ou negativo, isto é, a sensibilidade do processo sujeita a existência de resultados aleatórios ou furtivos quando não são tomados cuidados necessários de estudo e avaliação do processo e a sua respetiva bibliografia, bem como toda a segurança de trabalho e funcionamento da máquina requeridos. De referir, ainda, que a geometria, forma e tamanho das amostras de teste influencia significativamente a definição dos parâmetros do processo. Dentro das amostras estudadas, potências na ordem dos 1000 W revelaram-se as mais apropriadas, ainda que tivessem causado empenos nos provetes. Contudo, a associação destas potências a várias velocidades e taxas de deposição permitiu cumprir com o objetivo da deposição em amostras de teste, amostras estas que seriam posteriormente testadas à fadiga nos laboratórios da FEUP. Já o material de deposição usado nas deposições finais, o *Inconel 625*, de entre todos os apresentados e testados, apresentou-se o mais coerente, produzindo cordões de boas geometrias, com diluições reduzidas e ZTA's mais homogêneas, independentemente do material sob o qual era depositado, provando aqui ser o pó de deposição mais indicado a ser usado para os testes finais de fadiga.

Terminada a experiência na *SERMEC Group*, realizaram-se ensaios de fadiga nas instalações da faculdade aos provetes outrora produzidos, transformados e depositados na empresa. Cedo se compreendeu a necessidade de evitar o uso do processo de *laser cladding* nos ferros fundidos, que dada a sua baixa ductilidade tornaram o processo de desempenho um desafio. No que toca ao comportamento em termos de fadiga dos materiais revela-se uma diminuição em termos de resistência à fadiga dos mesmos em comparação com resultados da literatura. Dada a peculiar sensibilidade deste processo, atingiram-se resultados de variadas gamas, contudo as tensões médias de rotura dos materiais estudados variaram entre os 450 a 500 MPa e o número de ciclos de fadiga rondava os 300000 ciclos para os mesmo materiais. Relativamente à influência dos parâmetros de operação do revestimento a *laser*, a grande conclusão a reter passa pela maior homogeneidade e constância dos resultados obtidos nos aços, ao invés de nos ferros fundidos se verificar uma aleatoriedade mais vincada de resultados. Ainda de se notar, que o local da fratura dos provetes comprovou ser mais indicado (rotura na zona central de deposição) para o primeiro de conjunto de provetes, onde as potências de *laser* eram mais reduzidas. Dentro deste ponto, é de referir que o processo de desempenho dos provetes previamente aos ensaios de fadiga podem ter adulterado superficialmente alguns resultados.

No fundo, este projeto tratou-se de um trabalho com um grande foco no estudo do processo de fabrico *laser cladding* teórica como praticamente. A possibilidade de diariamente estar em contacto com a máquina e o *software* usados na empresa permitiu um desenvolvimento mais aprofundado dos pormenores e detalhes deste método de fabrico. Não só a partilha do conhecimento científico e teórico como também a partilha do conhecimento técnico e prático, construíram uma base sólida relativos a este processo vanguardista que irá certamente num futuro breve permitir à indústria metalúrgica poder catapultar os seus negócios.

Assim sendo, e em jeito de passagem de testemunho a futuros possíveis trabalhos relativos a esta área de conhecimento e que advenham do projeto aqui relatado, salientam-se algumas perspetivas de estudos futuros:

- Comparação de ensaios de fadiga entre provetes depositados por *laser cladding* e provetes provenientes de processos de soldadura convencional;
- Comparação de ensaios de fadiga em provetes depositados e provetes sem deposições, isto é, provetes virgens, de modo a usá-los como referência aos resultados obtidos para os provetes depositados;
- Análise estrutural e microestrutural dos provetes após a fratura, com o intuito de avaliar durezas, composições e variações químicas, tensões residuais, porosidades, fendas microscópicas, entre outros;
- Teste e aplicação de diferentes técnicas de pós-processamento depois das deposições, com vista a atingir melhores resultados em termos de propriedades mecânicas dos materiais, mas principalmente melhorias em termos de vida de fadiga dos mesmos.
- Aplicar diferentes estratégias de deposição visando ultrapassar o efeito de entalhe no final da caixa maquinada. Tal poderia ser conseguido com uma deposição direta em toda a superfície do provete em tração, excluindo apenas a zona dos apoios;

- Utilização de um pequeno suporte ou gabaris nas deposições para garantir um melhor controlo geométrico e um posicionamento exato dos provetes, para evitar os desvios observados nas deposições em relação à caixa maquinada e empenos excessivos.

6. Referências

- Aços, R. (2017). "FR 3." from http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-aos-ligados/fr-3_.html.
- Aços, R. (2017). "G15 Special." from http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-cementaa-ao/g15-special-_copia.html.
- Association, I.-I. M. (2008). "Case-hardening steel." from <http://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-alloy-steels-irons/case-hardening-steel.php>.
- Barsom, J. M. and S. T. Rolfe 7.1 Introduction. Fracture and Fatigue Control in Structures - Applications of Fracture Mechanics: (MNL 41), ASTM International.
- Campbell, F. C. 1.1 Industrial Significance of Fatigue. Fatigue and Fracture - Understanding the Basics, ASM International.
- Chew, Y., J. H. L. Pang, G. Bi and B. Song (2017). "Effects of laser cladding on fatigue performance of AISI 4340 steel in the as-clad and machine treated conditions." Journal of Materials Processing Technology 243: 246-257.
- Corp., S. S. A. (2016). "AerMet® 100 Alloy - Data Sheet." from <https://www.ssa-corp.com/documents/Data%20Sheet%20AerMet100.pdf>.
- Dierken, D.-I. R. (2013). Training ERLASER Hard + Clad. Part III: Cladding.
- Dijkkamp. (2015). "Characteristics of GGG70." from <http://www.dijkkamp.nl/en/materials/ggg70-en-gjs-700-2/>.
- Dijkkamp. (2015). "Characteristics of GGG50." from <http://www.dijkkamp.nl/en/materials/ggg50-en-gjs-500-7/>.
- Dr. Sc. Ing Torims, T. (2013). The Application of Laser Cladding to Mechanical Component Repair, Renovation and Regeneration. DAAAM International Scientific Book. Vienna, Austria: 587-608.
- Foundry, D. (2014). "ASTM A536 100-70-03." from <http://www.iron-foundry.com/astm-a536-70-03-gjs-700-ggg70-ductile-iron.html>.
- GmbH, E.-E. L. (2015). Manual de Instruções - ERLASER HARD + CLAD.
- Group, S. (2017). "SERMEC II - Indústria, Comércio, Serviços, S.A.", from <http://www.sermec2.pt/index.php>.
- Group, S. (2017). "SERMEC Wind Power." from <http://www.sermecwindpower.pt/index.php>.
- metco, O. (2016). Ni-based super alloy (Inconel 625).
- Oberg, E., F. D. Jones, H. L. Horton and H. H. Ryffel Cladding with Lasers. Machinery's Handbook (29th Edition) & Guide to Machinery's Handbook, Industrial Press.
- Parekh, R., R. K. Buddu and R. I. Patel (2016). "Multiphysics Simulation of Laser Cladding Process to Study the Effect of Process Parameters on Clad Geometry." Procedia Technology 23: 529-536.
- Ramos, G. F. d. S. (2016). Efeito da Maquinagem por Eletroerosão no Comportamento à Fadiga do Aço AISI D2. Master, Porto.
- Schneider, M. (1998). Laser Cladding with powder - Effect of some machining parameters on clad properties. Ph.D., University of Twente.

- Soares, P. A. d. C. M. (2014). Desenvolvimento do Processo de Laser Cladding com Metais para Fabrico Aditivo. Master, Porto.
- Steel&Tube. (2014). "Case hardening steel - 18CrNiMo 7-6." from <http://stainless.steelandtube.co.nz/wp-content/uploads/2014/06/CaseHardeningSteel18CrNiMo7.pdf>.
- Sun, S. D., Q. Liu, M. Brandt, V. Luzin, R. Cottam, M. Janardhana and G. Clark (2014). "Effect of laser clad repair on the fatigue behaviour of ultra-high strength AISI 4340 steel." *Materials Science and Engineering: A* 606: 46-57.
- Toyserkani, E., A. Khajepour and S. Corbin (2005). *Laser Cladding*. Universal Afir - Aços Especiais e Ferramentas, S. A. VCN 150 -- BOZD.
- Voestalpine, U. M.-. (2016). PLASweld™ Ferro 39
- Wikiwand. (2017). "Cladding (Metalworking)." from [http://www.wikiwand.com/en/Cladding_\(metalworking\)](http://www.wikiwand.com/en/Cladding_(metalworking)).
- Ya, W. (2015). *Laser materials interactions during cladding*. PhD, University of Twente.
- Zhuang, W., Q. Liu, R. Djugum, P. K. Sharp and A. Paradowska (2014). "Deep surface rolling for fatigue life enhancement of laser clad aircraft aluminium alloy." *Applied Surface Science* 320: 558-562.

ANEXO A: Desenho técnico dos provetes

ANEXO B: Gráficos dos resultados dos ensaios de fadiga por provete

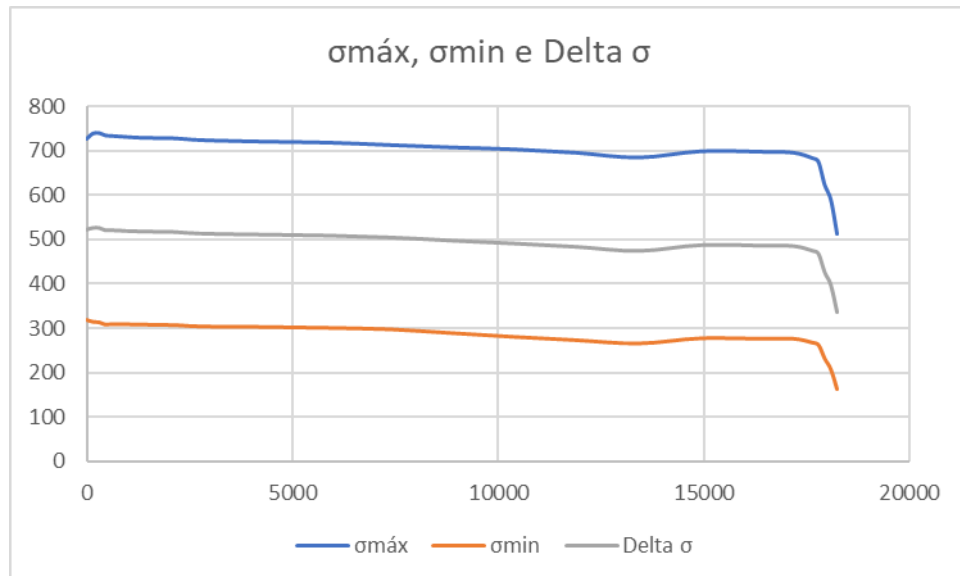


Figura 85 – Resultados Ferro Fundido: Provete 1.

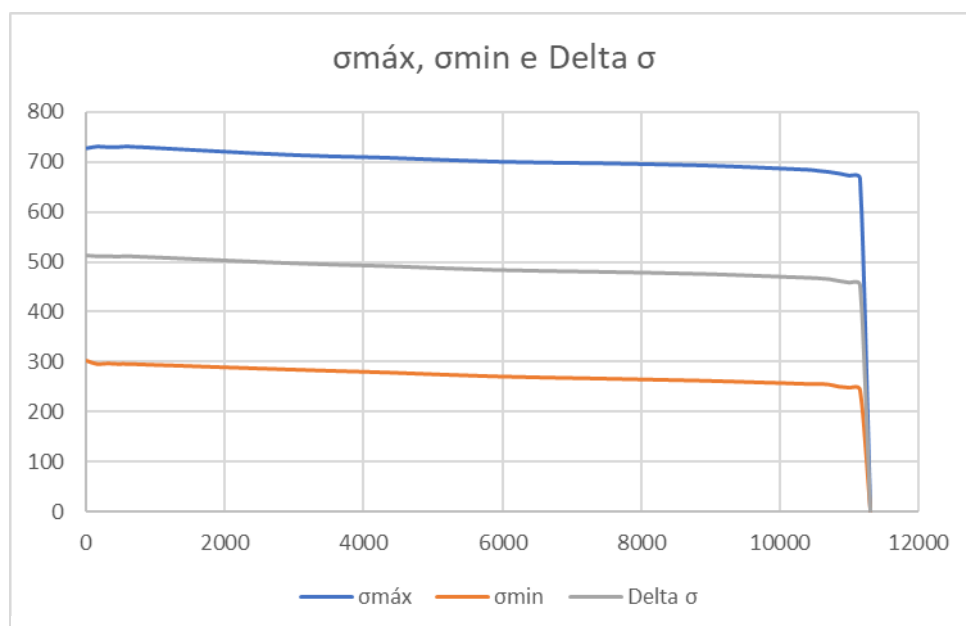


Figura 86 – Resultados Ferro Fundido: Provete 2.

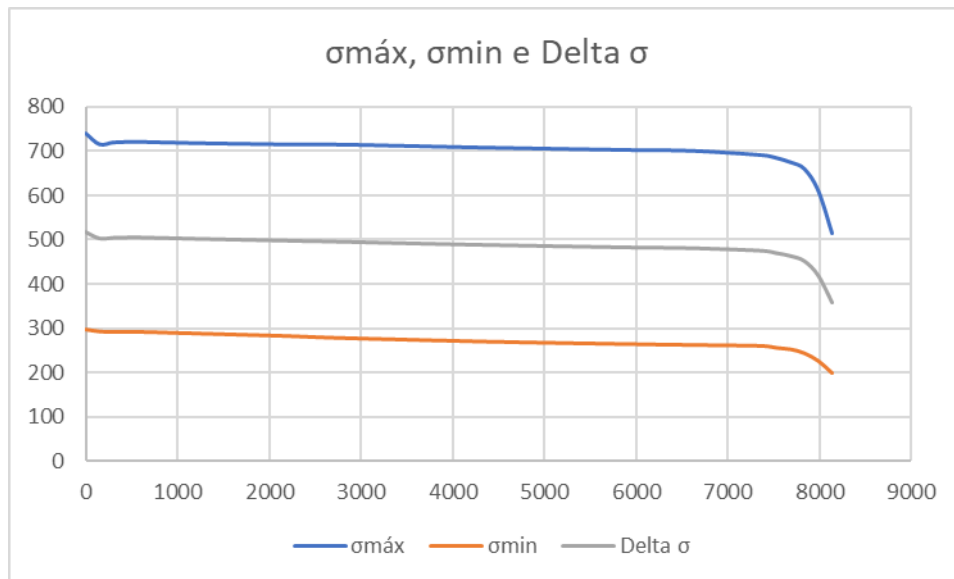


Figura 87 – Resultados Ferro Fundido: Provete 4.

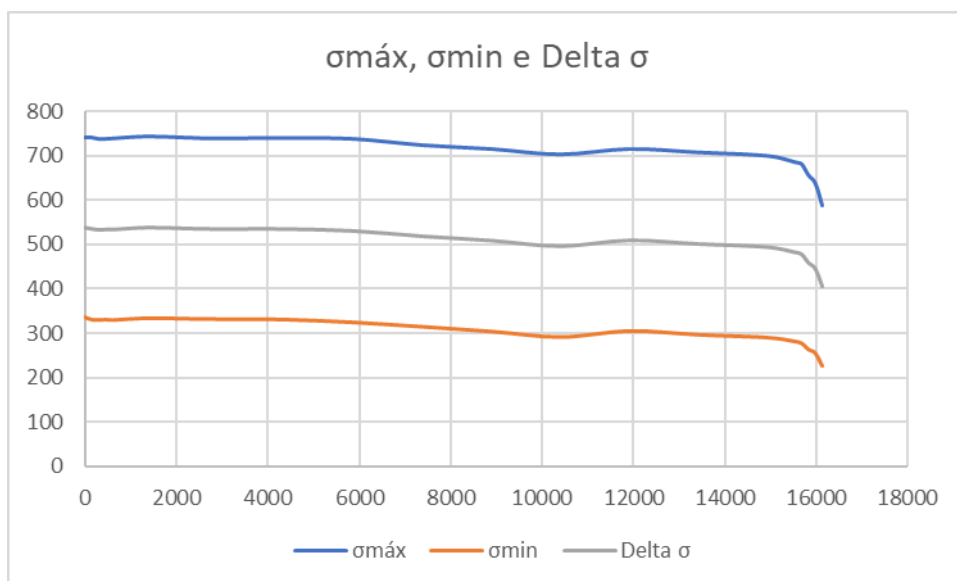


Figura 88 – Resultados Ferro Fundido: Provete 5.

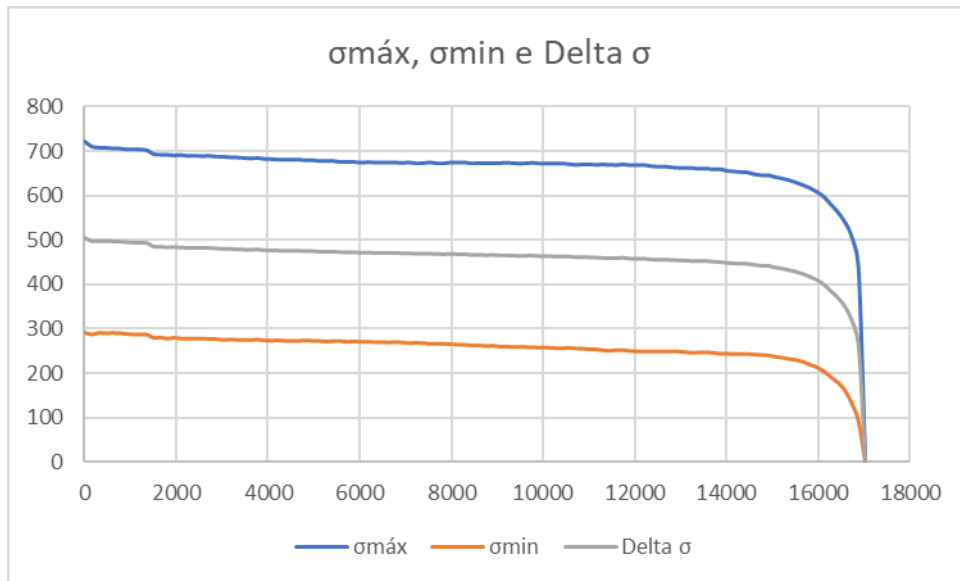


Figura 89 – Resultados Aço: Provete 6.

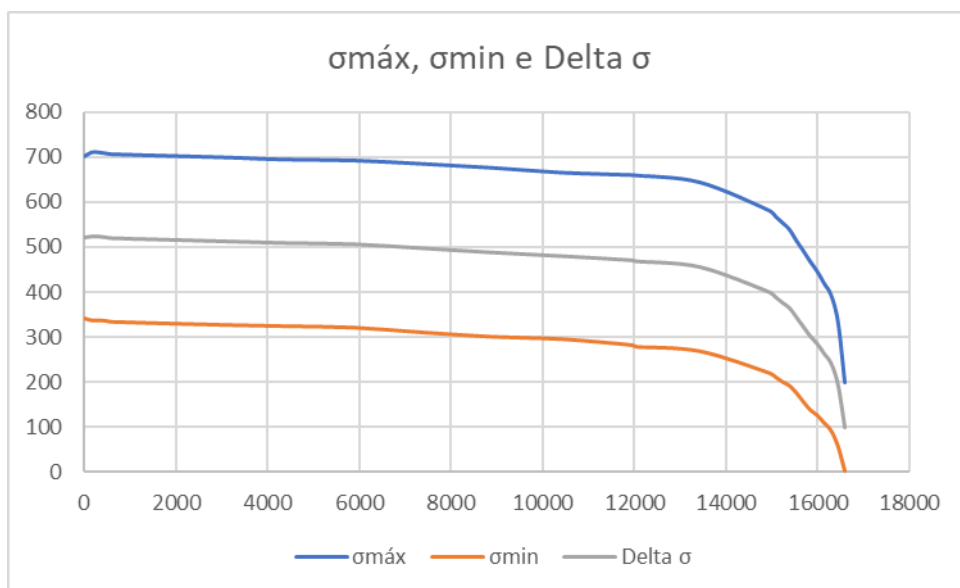


Figura 90 – Resultados Aço: Provete 7.

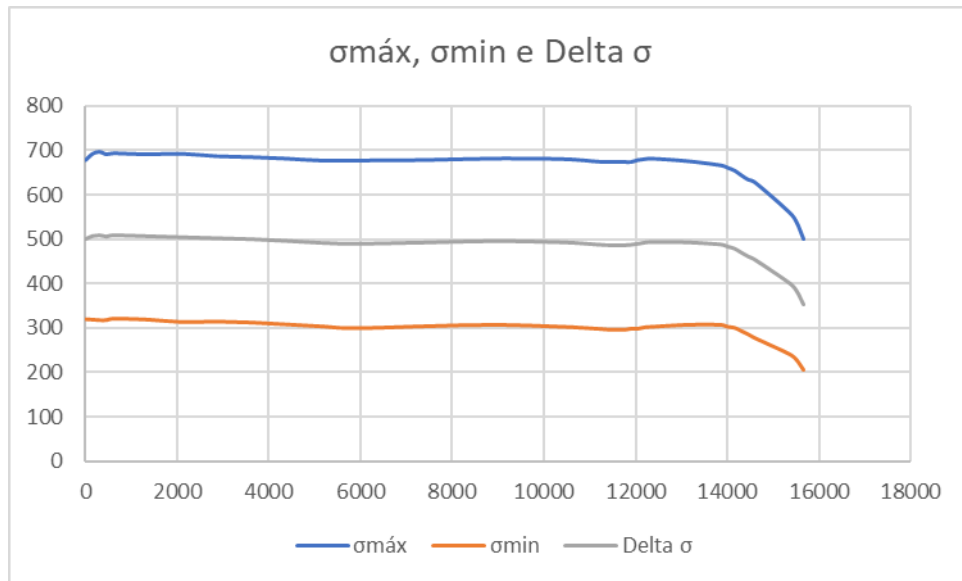


Figura 91 – Resultado Aço: Provete 8.

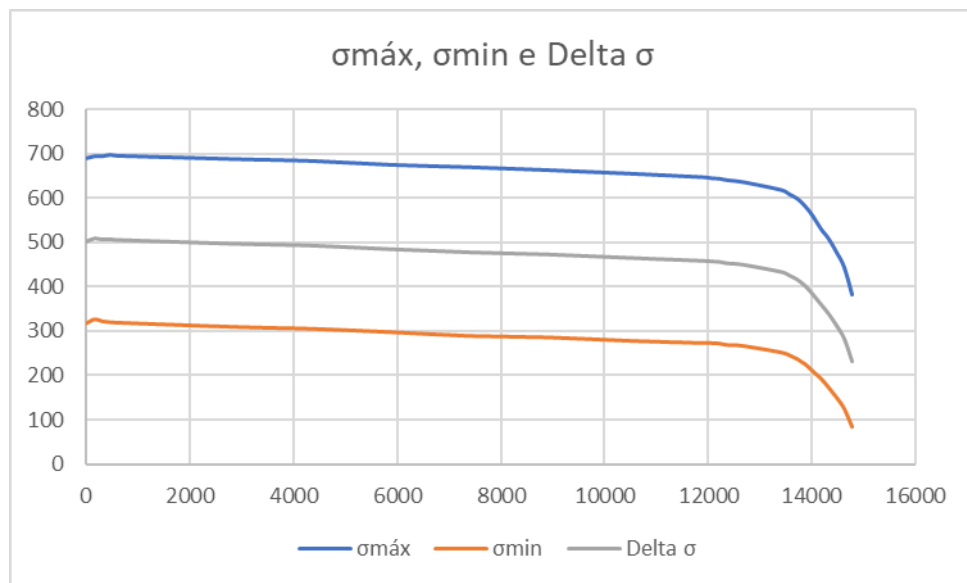


Figura 92 – Resultados Aço: Provete 9.

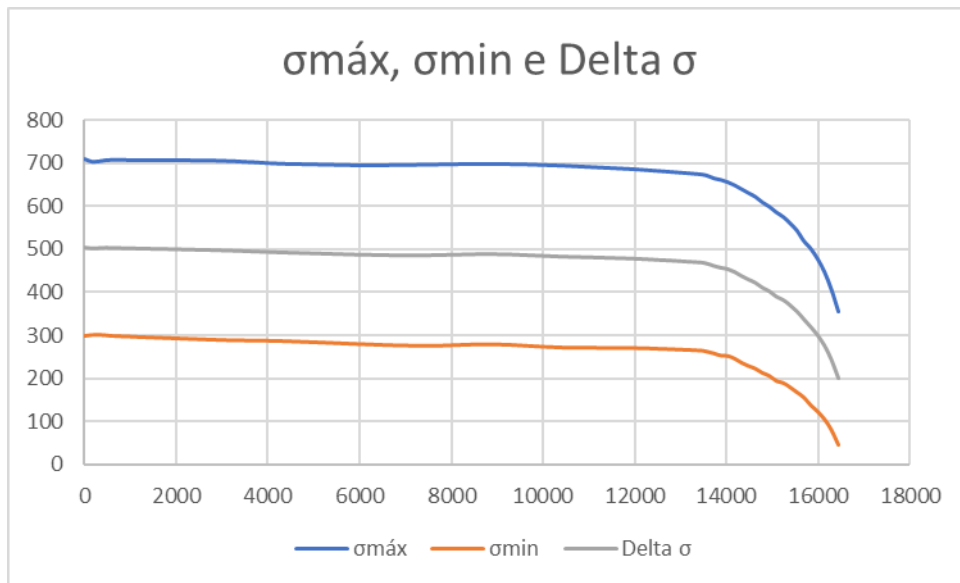


Figura 93 – Resultados Aço: Provete 10.

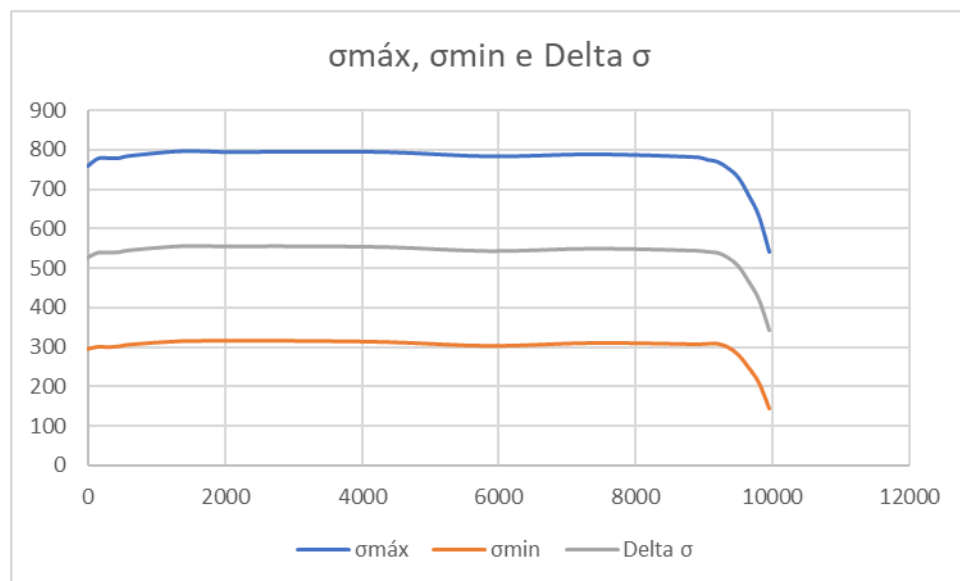


Figura 94 – Resultados Ferro Fundido: Provete 11.

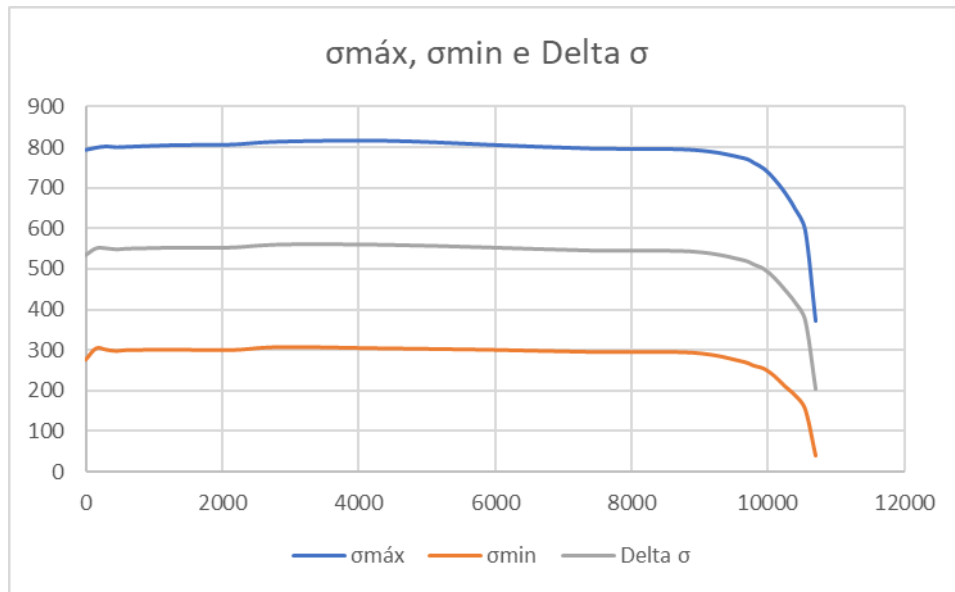


Figura 95 – Resultados Ferro Fundido: Provet 13.

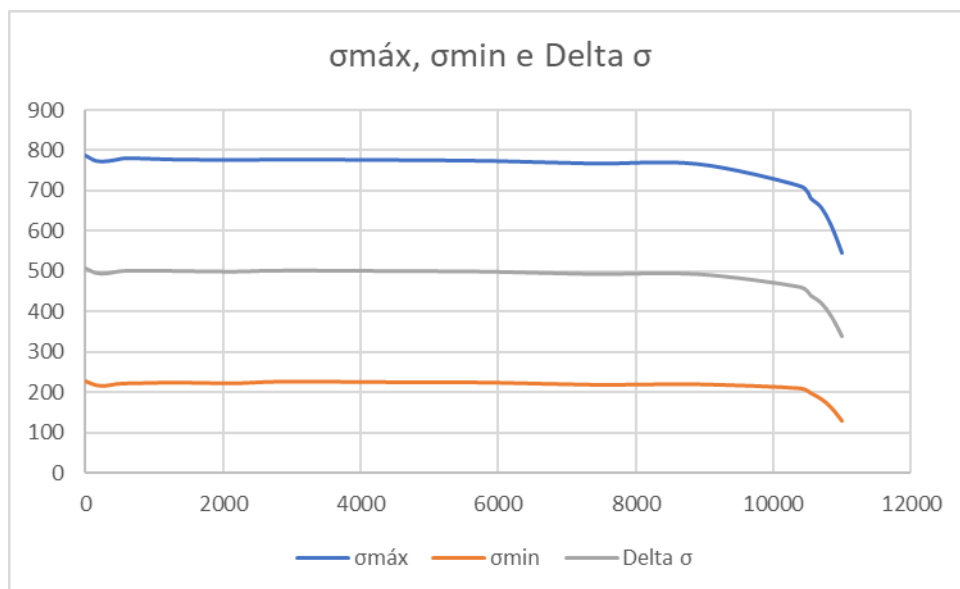


Figura 96 – Resultados Ferro Fundido: Provet 14.

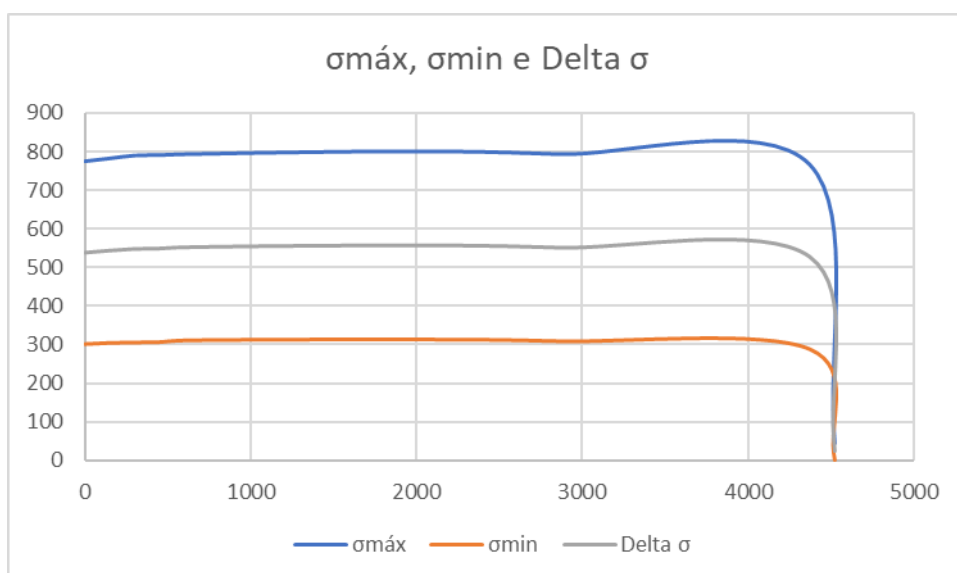


Figura 97 – Resultados Ferro Fundido: Provete 15.

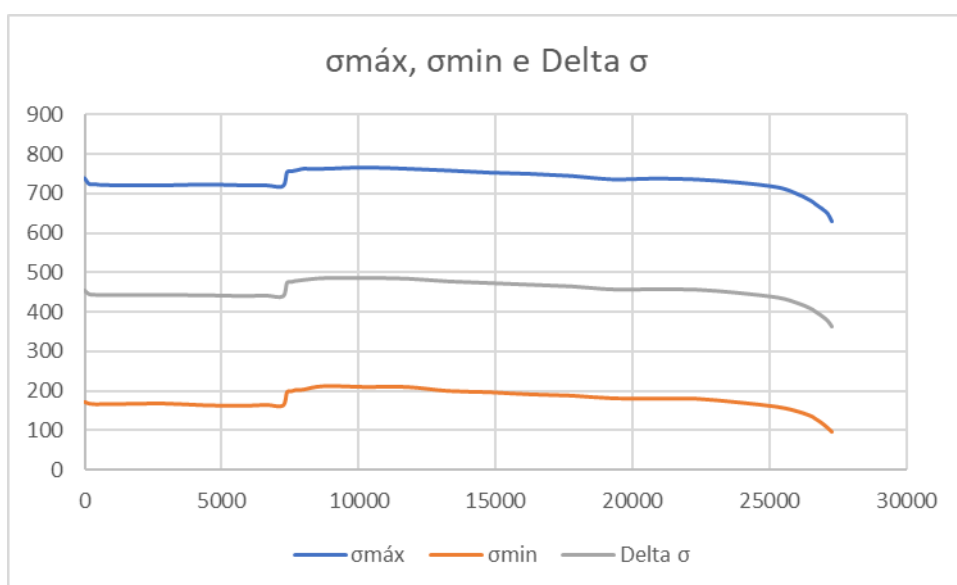


Figura 98 – Resultados Aço: Provete 16.

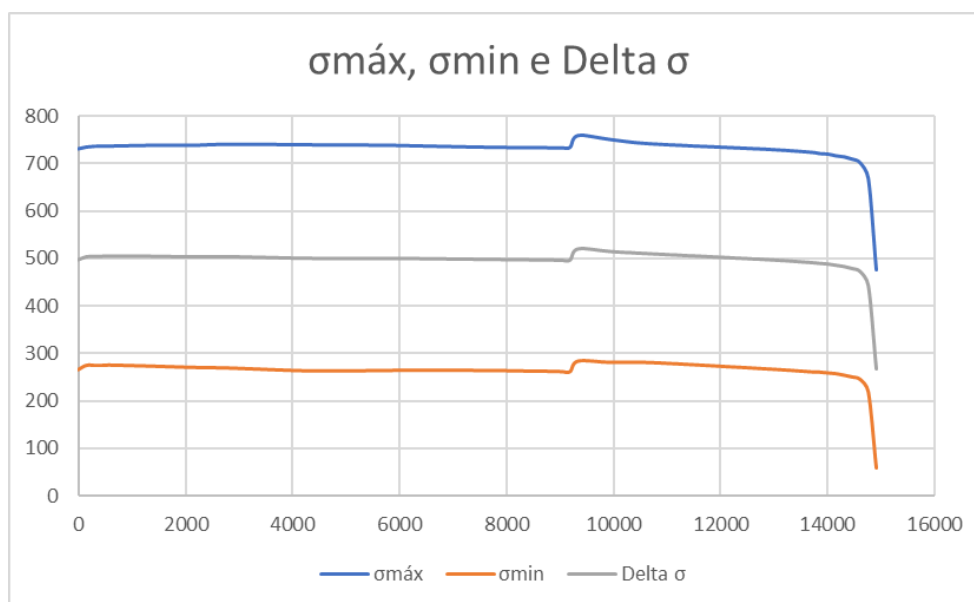


Figura 99 – Resultados Aço: Provete 17.

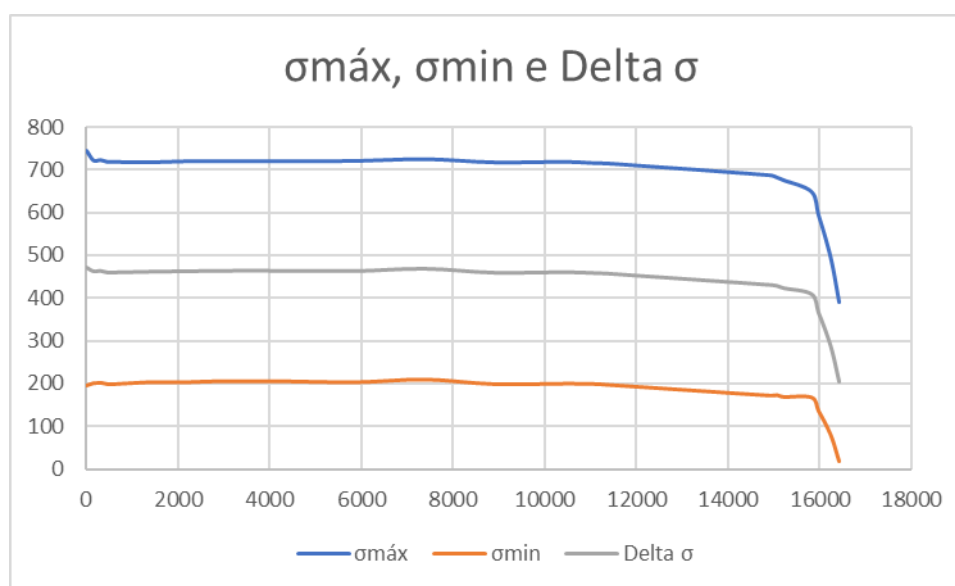


Figura 100 – Resultados Aço: Provete 18.

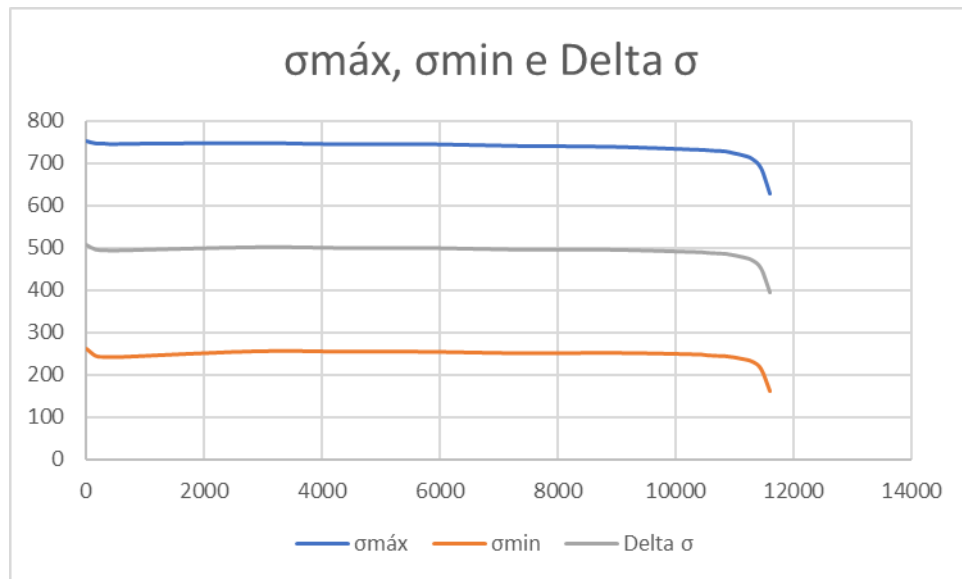


Figura 101 – Resultados Aço: Provet 19.

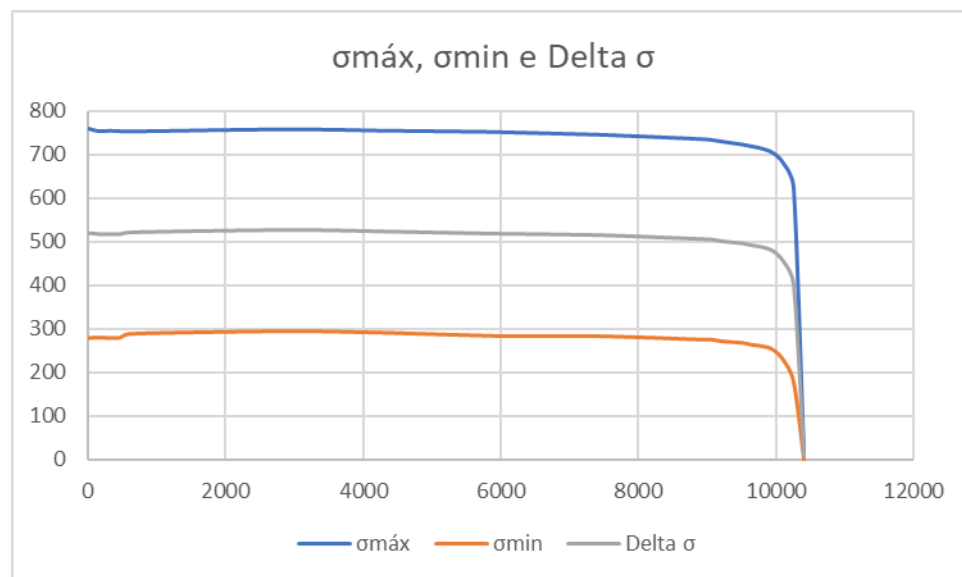


Figura 102 – Resultados Aço: Provet 20.