

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE CONTROLO DE UM SISTEMA LABORATORIAL DE LASER CLADDING

CONTROL PARAMETERS STUDY OF A LASER CLADDING LABORATORY SYSTEM

T. L. M. Morgado^{1, 2, 3}, J. Torres^{1, 2}, C. Valente^{1, 2}, H. Navas^{1, 2}

¹DEMI/ FCT/ UNL - Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

²UNIDEMI - Unidade de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

³ESTA/ IPT - Escola Superior de Tecnologia de Abrantes, Instituto Politécnico de Tomar



RESUMO

Este artigo apresenta o estudo dos parâmetros de controlo no processo de automatização de um equipamento laboratorial de LASER Cladding. Este estudo é crucial para responder às exigências requeridas, no que diz respeito às propriedades mecânicas e à durabilidade, em diversos componentes mecânicos, nas indústrias, aeronáutica, naval, siderúrgica, mineira, dos moldes, em aplicações biomédicas, entre outras. Neste âmbito, são apresentados também os resultados de ensaios com deposições a três velocidades, v , diferentes e quatro caudais mássicos, \dot{m} , diferentes da liga Ti52Ta, mantendo-se constantes os parâmetros de processo, potência do LASER - P , distância do substrato ao foco LASER - F distância do bocal ao banho de fusão - d , ângulo de incidência - α e comprimento do revestimento - C , relacionando assim parâmetros como penetração, altura de cordão, ângulo de revestimento, diluição e eficiência de deposição.

ABSTRACT

This paper presents the control parameter study of an LASER Cladding laboratorial equipment. It is crucial to study the influence of manufacture control parameters in the mechanical properties and durability of mechanical components to responding to the demands of industry as aeronautic, naval, metallurgical, moulds, biomedical, etc. It is discussion the Ti52Ta deposition tests results, were the process parameters as LASER Power P , distance from the substrate to the LASER focus - F distance from the nozzle to the fusing bath - d , angle of incidence - α and coating length - C , were kept constant. An influence study of parameters such as penetration, cord height, coating angle, dilution and deposition efficiency is present.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de LASER Cladding foi introduzido e patenteado por Daniel S. Gnanamuthu em 1976, nos Estados Unidos

da América (Gäbler, 2016; Toyserkani et al, 2005). O motivo da sua criação foi melhorar a qualidade da superfície de componentes mecânicos, ultrapassando as

desvantagens já conhecidas em processos tradicionais de soldadura. Nos anos 80 do século XX, o LASER Cladding começou a despertar a atenção da indústria, tendo sido identificado como um processo que apresenta grandes vantagens ao nível da melhoria da resistência à corrosão e ao desgaste dos revestimentos sobre os processos convencionais. O primeiro relato do seu uso na indústria ocorreu em 1981, na Rolls Royce, no revestimento de componentes de pás de turbina feitas de Nimonic, que viriam a ser utilizadas no motor a jato RB-211, tendo depois a sua utilização estendido às companhias que lideravam o ramo da produção de motores na altura. No caso da indústria automóvel, a tecnologia passou a ser aplicada também no revestimento das válvulas dos motores, como no caso da Fiat, da Toyota ou da Mercedes-Benz. Ainda na mesma década, a técnica foi largamente reconhecida pelo mercado da reparação, principalmente no caso das pás de turbina, tanto nos Estados Unidos como na Europa (Toyserkani et al., 2005).

Ainda no século XX, anos 90, foram introduzidos e patenteados um largo número de métodos de prototipagem rápida e também de manufatura por camadas para produção de estruturas tridimensionais, que já recorriam aos princípios do processo LASER Cladding, fazendo agora parte das soluções comercialmente disponíveis (Valente, 2017).

Para além da larga utilização da denominação de LASER Cladding para designar este processo, outras denominações são encontradas na literatura, sendo escolhidos de acordo com a aplicabilidade concreta do processo a que os autores se referem. Tendo isto em conta, como alternativas ao nome LASER Cladding para denominar o processo, que parece ser a mais comumente utilizada, encontram-se outras denominações como *Direct Metal Deposition*, *LASER Engineered Net Shapping*, *LASER Direct Casting*, *LASER Consolidation*, *LASER Powder Fusion*, *LASER Metal Forming*, *Directed Light Fabrication*, *LASER Powder Deposition*, entre outras também referidas por (Toyserkani et al., 2005).

O LASER Cladding é uma técnica em que o feixe de LASER é utilizado como fonte de calor para fundir a superfície do material do substrato e o material de revestimento, com diferentes propriedades metalúrgicas (Schneider, 1998; Onwubolu et al., 2007). É um processo que permite obter finos revestimentos para proteção do substrato, melhorando as propriedades mecânicas da superfície do componente metálico (Li et al., 2004). O revestimento adicionado, em geral, possui uma maior dureza, maior resistência ao desgaste e à corrosão do que substrato (Farnia et al., 2012; Onwubolu et al., 2007; Navas et al., 2005; Morgado et al., 2016).

A tecnologia de LASER Cladding tem-se tornado cada vez mais reconhecida no meio industrial e pelos mais variados grupos de investigação. O seu potencial tem vindo a aumentar à medida que a investigação sobre a tecnologia continua.

No âmbito deste artigo, são estudados os parâmetros de controlo de um sistema laboratorial de LASER Cladding com o objetivo de automatizar o processo de obtenção experimental de novas ligas metálicas, e consequentemente estudar a influência desses parâmetros nas propriedades mecânicas das mesmas. São apresentados os resultados da influência dos parâmetros de fabrico por LASER Cladding da liga Ti52Ta.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os LASER são utilizados como fonte de calor no processamento de materiais, por permitirem elevadas entregas térmicas, que conduzem a pequenas zonas termicamente afetadas, ao contrário das fontes de calor convencionais, como por exemplo o arco elétrico. A evolução da tecnologia dos LASER e a introdução no mercado dos LASER de fibra, de elevada potência, permitiu reduzir significativamente os custos de utilização e de manutenção, quando comparados com os lasers de CO₂ ou os LASER de Nd:YAG convencionais. Estes LASER de fibra permitem ainda, uma maior flexibilidade, assim como uma maior facilidade de controlo e de automatização (Jhavar et al., 2013).

A superfície do material é aquecida pela absorção da energia do feixe de LASER. A interação do feixe de laser de elevada potência num ponto bem confinado da superfície origina uma elevada entrega térmica e consequentemente uma elevada taxa de aquecimento. Após a passagem do LASER, devido ao rápido escoamento do calor gerado pela condução para a periferia por condução, são geradas também taxas de arrefecimento elevadas.

O comprimento de onda do feixe de LASER e os materiais utilizados são dois principais parâmetros que influenciam a absorção de energia emitida pela fonte de calor, entre outros fatores (Quintino et al., 2007). Para pequenos comprimentos de onda, uma maior quantidade de energia da radiação é absorvida pelo material, reduzindo a refletividade e aumentando a absorção superficial. A absorção não depende somente do comprimento de onda, mas também do tipo de material, entre outros fatores. Desta forma no processamento de materiais é importante optar por um tipo de LASER adequado aos materiais/ligas a processar, tendo em conta as propriedades óticas da superfície do material como a absorção e a reflexão; as propriedades térmicas como a condutividade, a difusibilidade e a capacidade calorífica, as temperaturas de fusão e de vaporização.

A alimentação da liga de adição durante o processo de deposição pode ser realizada com um sistema de alimentação coaxial (Fig.1 a)) ou lateral (Fig. 1 b)). Embora a configuração de adição de pós coaxial tenha vantagens sobre o lateral, pois permite realizar deposições em qualquer direção e permite uma maior eficiência de deposição, no âmbito deste trabalho optou-se por implementar a configuração lateral por ser uma configuração mais económica.

2.1. Descrição do sistema laboratorial LASER Cladding

O sistema laboratorial LASER Cladding, utilizado no âmbito deste trabalho, é constituído por um LASER IPG YLR 200 AC, três guias motorizadas de movimento linear OWIS LTM 80F-150, um alimentador de pós PLASMA-TECHNIK AG TWIN 10C,

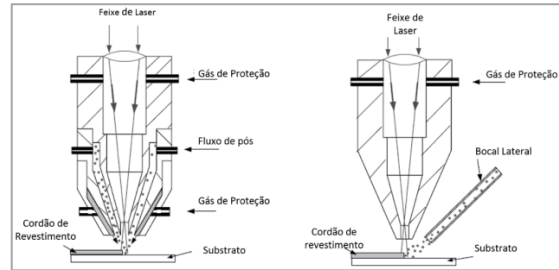


Fig.1 - Configurações possíveis para a alimentação de pós: a) configuração coaxial, b) configuração lateral (Torres, 2015)

uma câmara de luvas e um computador, propriedade do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (ver Fig. 2).

A câmara de luvas é utilizada para criar uma atmosfera inerte, a fim de minimizar a oxidação e contaminação do banho de fusão, pela exposição ao azoto e ao oxigénio, por isso deverá ser garantida a sua estanquicidade. E a estrutura de apoio de todo o sistema de posicionamento, tanto das guias como do LASER e respetivo bocal de adição do material, deverá ser o mais leve possível de forma a permitir deslocamentos mais rápidos e regulares permitindo otimizar os parâmetros de controlo velocidade, estabilidade do LASER e respetivo bocal (Fig. 3 e Fig 4).

A Fig. 5 ilustra o ajuste da distância d entre a extremidade do bocal ao banho de fusão, a distância F entre o foco do LASER e a superfície do substrato e o ângulo de incidência do fluxo de pós α ao banho ao banho de fusão. Estes parâmetros têm que se controlados/ garantidos durante todo o processo.



Fig. 2 - Sistema laboratorial LASER Cladding: a) LASER IPG YLR 200 AC; b) alimentador de pós PLASMA-TECHNIK AG TWIN 10C c) Câmara de luvas; d) computador pessoal (Torres et al, 2015).

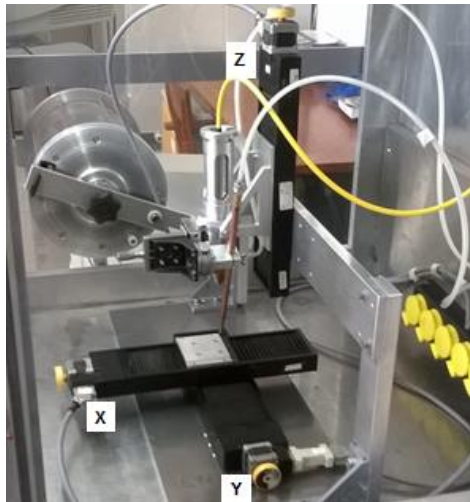


Fig. 3 - Sistema de posicionamento constituído por três guias motorizadas de movimento linear OWIS LTM 80F-150 (X, Y, Z) (Torres et al, 2015).

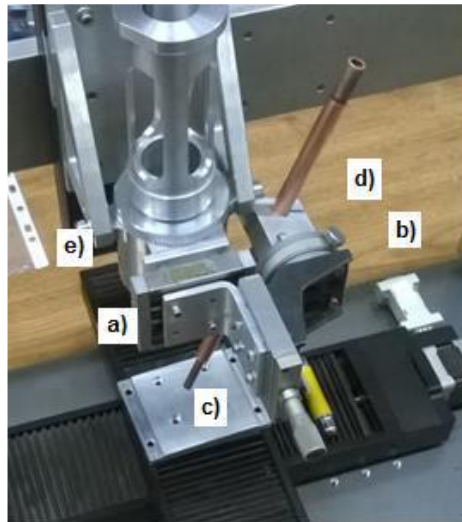


Fig. 4 - Sistema de posicionamento do bocal de adição de material: a) guia de movimentação linear, b) guia de movimento angular, c) componente de fixação das guias, d) componente de fixação do bocal, e) espaçador de posi-onamento do bocal.

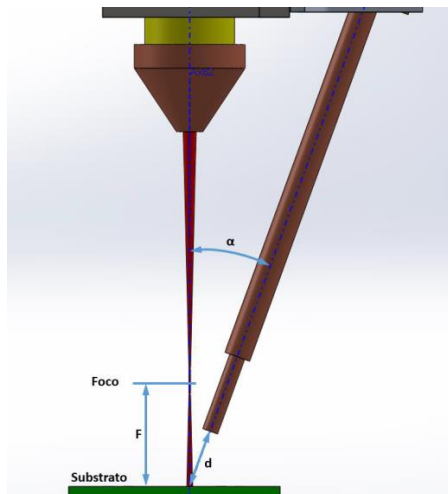


Fig. 5 - Ajustes possíveis no sistema implementado (Torres, 2015)

2.2. Desenvolvimento do sistema de controlo do processo laboratorial LASER Cladding

Foi desenvolvido um programa de controlo que permite controlar simultaneamente os principais equipamentos do processo ou seja, o LASER IPG YLR (Fig 2 a)), o alimentador de pós PLASMA-TECHNIK AG TWIN 10C (Fig. 2 b)), e as guias motorizadas de movimento linear (XYZ) da OWIS (Fig. 3).

O LASER IPG YLR 200 AC permite ser controlado remotamente pelo protocolo de comunicação RS-232 (ver Fig. 6), através do envio de instruções de comando especificadas pelo fabricante. As guias de movimento linear são controladas pela placa de controlo SM30 da OWIS através das funções de controlo definidas pelo fabricante.

O alimentador de pós (Fig. 2 b)) permite ser controlado remotamente através de conector de controlo remoto. Este equipamento é constituído por dois contentores, onde podem ser introduzidas duas ligas de revestimento diferentes, A e B. Durante o processo de fabrico, pode ser alterada a composição da liga de revestimento obtida pode ser alterada pela variação do caudal mássico de A e de B. Para proceder ao seu controlo através do computador foi desenvolvido um controlador constituído por um microcontrolador Arduino Nano. O princípio de funcionamento do controlador desenvolvido está esquematizado na Fig. 7.

Foi também desenvolvida uma aplicação informática para o controlo do processo na linguagem de programação C Sharp, ou C#, desenvolvida pela Microsoft. Na Fig. 8 estão identificadas as principais rotinas implementadas, para o controlo do processo, no layout de comunicação com o utilizador/ investigador: A) definição dos parâmetros de processo; B) controlo de iniciação

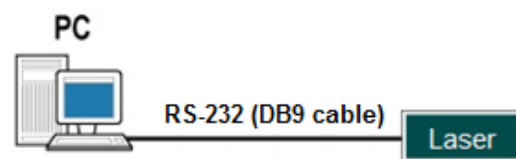


Fig. 6 - Estrutura de controlo do processo laboratorial LASER Cladding

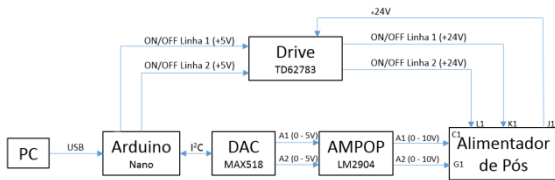


Fig 7 - Esquema do princípio de funcionamento do controlador do alimentador de pós

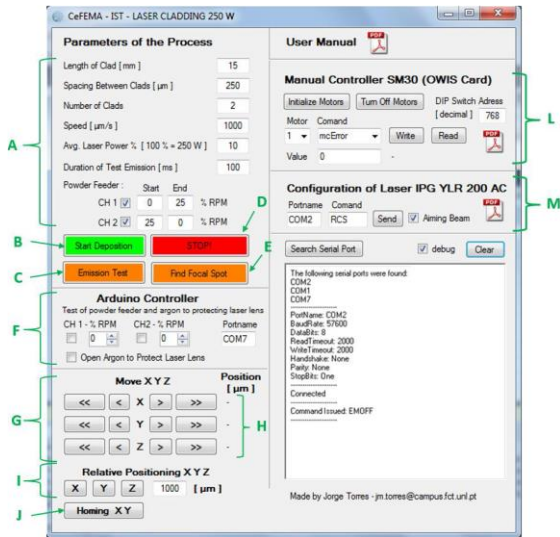


Fig. 8 - Layout de controlo do sistema laboratorial LASER Cladding: A) parâmetros do processo; B) início; C) teste de emissão de radiação; D) paragem de emergência; E) ponto focal; F) controlo do Arduino; G) mover as mesas X, Y e Z; H) posição relativa das mesas X, Y e Z; I) distância relativa em μm ; J) limites das mesas X e Y; L) configuração manual da placa SM30 da OWIS; M) configuração manual do LASER IPG YLR

do processo; C) possibilidade de teste de emissão de radiação; D) controlo de paragem de emergência; E) identificação do ponto focal; F) controlo do Arduino (alimentador de pós e a electroválvula de argon para a proteção das lentes do LASER); G) controlo do movimentos X, Y e Z; H) indicação da posição relativa das mesas X, Y e Z; I) indicador dos deslocamentos das mesas X, Y e Z uma distância relativa em μm ; J) controlo dos limites das mesas X e Y; L) controlo e configuração manual da placa SM30 da OWIS; M) controlo e configuração manual do LASER IPG YLR. Este layout foi programado de forma a ser amigável do utilizador e inclui o acesso a manuais em pdf, como o manual de utilização do sistema laboratorial LASER Cladding (User Manual), o manual do fabricante das guias e o LASER YLR 200 AC.

3. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA LABORATORIAL LASER CLADDING

Foram realizados ensaios com deposições da liga Ti52Ta com o objetivo de encontrar a gama de parâmetros do processo que permitisse obter os resultados de deposição razoáveis. Nestes ensaios de deposição foram mantidos constantes diversos parâmetros do processo, como a potência do LASER, P, a distância do substrato ao foco do feixe de LASER, F (ver Fig 5), a distância da extremidade do bocal ao banho de fusão, d, o ângulo de incidência, α , e o comprimento do revestimento, C.

Foi constatado que entre os vários parâmetros do processo, os parâmetros que influenciavam significativamente a geometria das deposições eram a velocidade de deposição e o caudal mássico de pós da liga de revestimento.

Para estudar a influência da variação destes dois parâmetros na geometria do revestimento, optou-se por realizar deposições com três velocidades diferentes: E1= 5 mm/s, E2= 7,5 mm/s e E3=10 mm/s. Para cada velocidade de deposição foram realizadas quatro deposições, com quatro caudais mássicos diferentes. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de deposições escolhidos, onde o caudal mássico é representado por \dot{m} e a velocidade de deposição por ϑ .

Tabela 1 Parâmetros de deposição escolhidos

Deposição	E1				E2				E3			
	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª	2ª	3ª	4ª
\dot{m} [g/min]	3,58	4,54	5,95	6,92	4,54	5,95	6,92	8,11	4,54	5,95	6,92	9,34
ϑ [$\mu\text{m/s}$]	5000				7500				10000			
F [mm]	22											
C [mm]	20											
P [W]	245											

As amostras produzidas foram seccionadas transversalmente aproximadamente a meio do comprimento das deposições, foram embutidas em resina epóxica. As superfícies transversais foram lixadas e polidas para serem medidos os principais parâmetros das deposições produzidas, como a altura do revestimento, H, a profundidade de penetração do revestimento no substrato, D, o ângulo do revestimento, β , a área do revestimento

produzido, Arev., e a área de diluição do material de adição no substrato, Adil.

As figuras 9, 10 e 11 apresentam respectivamente, a variação da profundidade de penetração e a altura do revestimento em função do caudal mássico de pós para as respetivas velocidades de deposição de 5,0 mm/s, 7,5 mm/s e 10 mm/s.

A Fig. 12 apresenta a variação do ângulo do revestimento com o substrato em função da variação do caudal mássico. O ângulo do revestimento produzido é um parâmetro importante uma vez que este influencia a porosidade criada nas deposições adjacentes, pelo que é necessário que este parâmetro exiba valores elevados de modo a evitar a criação de porosidade.

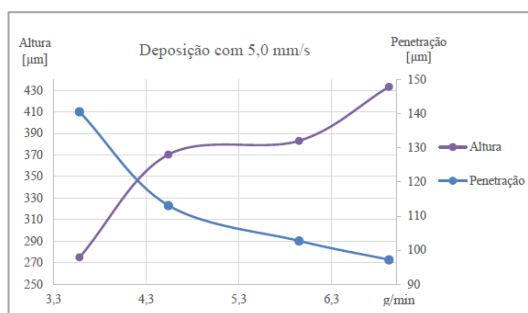


Fig 9 - Penetração e altura do cordão com velocidade constante de 5 mm/s

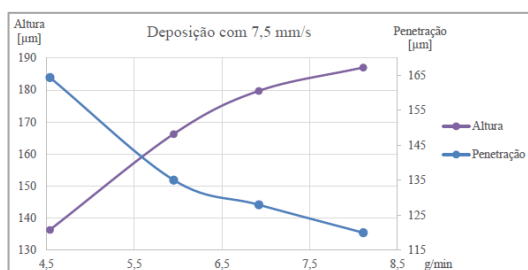


Fig 10 - Penetração e altura do cordão com velocidade constante de 7,5 mm/s

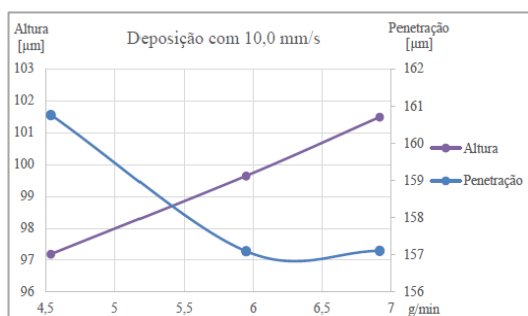


Fig 11 - Penetração e altura do cordão com velocidade constante de 10 mm/s

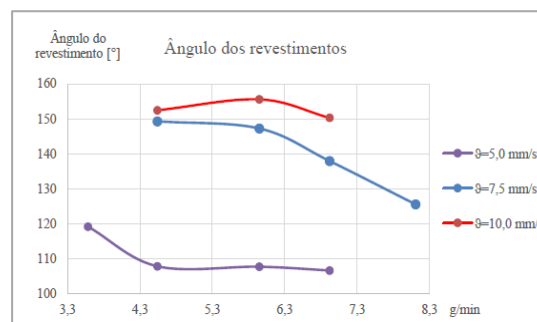


Fig 12 - Ângulos de revestimento

A Fig. 13 representa a variação da diluição entre o material de adição e o substrato, em função do caudal mássico para as diferentes velocidades de deposição. Os resultados de diluição apresentados representam a razão entre a área de diluição, Adil. e a área total Atotal.

A Fig. 14 apresenta a eficiência do processo de deposição assistida por LASER para os parâmetros de deposição apresentados na Tabela 1. A eficiência do processo de deposição é determinada pela razão entre a quantidade de material adicionado sobre a quantidade do material de revestimento injetado para o banho de fusão. É um parâmetro a ter conta, uma vez que em geral são utilizadas ligas de adição com um elevado custo monetário

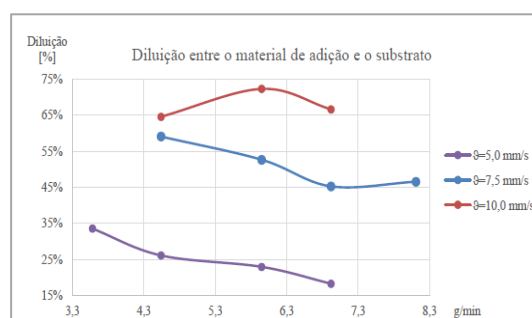


Fig 13 - Diluição entre o material de adição e o substrato

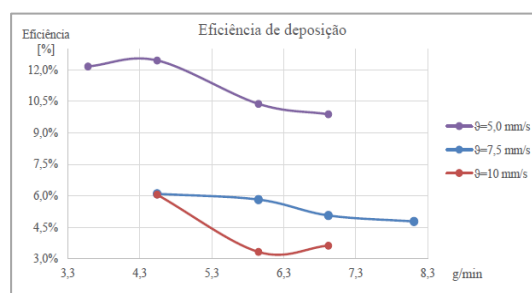


Fig 14 - Eficiência de deposição

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que a altura do revestimento aumenta com o aumento do caudal mássico, enquanto que a penetração do revestimento no substrato diminui com o aumento do caudal mássico. O ângulo do revestimento tende a diminuir com o aumento do caudal mássico, devido ao aumento da quantidade de material fornecida ao banho de fusão, por unidade de comprimento, que resulta num aumento da área de revestimento, através do aumento da altura do revestimento.

Conclui-se ainda que a diluição diminui com o aumento do caudal mássico. O aumento do caudal mássico leva a que uma maior quantidade da energia do feixe de LASER seja absorvida pelo caudal mássico de pós adicionado. Por outro lado, a diluição aumenta com o aumento da velocidade de deposição.

Os resultados obtidos permitiram ainda concluir que a eficiência de deposição tende a reduzir com o aumento do caudal mássico e com o aumento da velocidade de deposição, tendo sido obtida uma eficiência máxima de aproximadamente 12,5%, nos ensaios de deposição realizados. Além da eficiência ser afetada por estes parâmetros, constatou-se pelos ensaios de deposição que a eficiência de deposição é também afetada pela distância entre a extremidade do bocal ao banho de fusão d , pelo posicionamento do bocal de adição de pós ao banho de fusão, pela velocidade das partículas de pós, entre outros fatores. Devido à divergência do fluxo de pós na saída do bocal de adição, a área de incidência deste fluxo de pós aumenta com o aumento da distância d , o que leva à diminuição da eficiência de utilização de pós, uma vez que a área de incidência do feixe de LASER na superfície da amostra é menor do que a área de incidência do fluxo de pós na superfície.

Os resultados de deposição realizados permitiram constatar que os parâmetros de deposição, em particular o caudal mássico de pós e a velocidade de deposição, devem ser muito bem controlados para que os resultados obtidos sejam satisfatórios. Assim, a automatização do processo é

essencial para o sucesso deste processo de deposição assistida por LASER. Este estudo permitiu evidenciar a necessidade do posicionamento, com precisão, do fluxo de adição de material ao banho de fusão, uma vez que o seu *setup* influencia significativamente o resultado obtido de deposição.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT, I.P.) via Projetos nº PEst-OE/EME/UI0667/2011 e nº UID/CTM/04540/2013 e o apoio dos centros de investigação CeFEMA/IST-UL e UNIDEMI/FCT-UNL.

REFERÊNCIAS

- Farnia, A. et al. (2012). Effect of Ta on the Microstructure and Hardness of Stellite 6 Coating Deposited by Low Power Pulse Laser Treatments. *Surface and Coatings Technology*, V.213, 2012, PP.278–284. DOI:10.1016/j.surfcoat.2012.10.065.
- Gäbler F. (2016). Cladding rises to the top Diode LASER cutting. *Industrial LASER Solutions for Manufacturing*, vol. 31, n. 2, pp. 16–18, Mar/Abr 2016.
- Jhavar, S. et al. (2013). Causes of Failure and Repairing Options for Dies and Molds: A Review. *Engineering Failure Analysis*, V.34, 2013, PP.519–535.
- Li, M.X. et al. (2004). Laser Cladding Co-Based Alloy/SiCp Composite Coatings on IF Steel. *Materials and Design*, V.25, 2004, PP.355–358. DOI:10.1016/j.matdes.2003.08.006.
- Morgado T. L. M., Brites R., Navas H., (2016). Wear study of Innovative Ti-Ta alloys. *Procedia Struct. Integr.*, vol. 2, pp. 1266–1276, 2016.
- Navas, C. et al. (2005). Laser Coatings to Improve Wear Resistance of Mould Steel. *Surface and Coatings Technology*, V.194, 2005, PP.136–142.
- Onwubolu, G.C. et al. (2007). Prediction of Clad Angle in Laser Cladding by Powder Using Response Surface Methodology and Scatter Search. *Optics & Laser Technology*, V.39, 2007, PP.1130–1134.

- Quintino, L. et al. (2007). Welding with High Power Fiber Lasers – A Preliminary Study. *Materials & Design*, V.28 (I.4, 2007), PP.1231–1237.
- Schneider M. (1998). LASER CLADDING WITH POWDER: effect of some machining parameters on clad properties. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica de Twente, Holanda.
- Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. F., (2005). *LASER Cladding*. USA: CRC Press.
- Torres, J. (2015). Melhoria e Automação de um Sistema de Revestimento com Laser. Tese de Mestrado. FCT-UNL.
- Torres J. M. S. P., Morgado T. L. M., Navas H. V. G., (2015). Innovative Automation Equipment of LASER Cladding”. The 2015 International Conference on Systematic Innovation, Hong Kong, 2015.
- Valente, C. (2017). Estudo do Comportamento Mecânico de uma Liga de Titânio-Tântalo, Ti10Ta, Produzida por LASER Cladding. Tese de Mestrado. FCT-UNL.