

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DO PROCESSO LASER CLADDING NA DEPOSIÇÃO DA LIGA INCONEL 625

Ricardo Delgado de Souza¹

Francisco Ratusznei¹

Jurandir Marcos Sá de Sousa¹

João Victor El-Hage Meyer Osório¹

Fábio Antonio Xavier¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/nº, Trindade-CEP 88040-900 Florianópolis-SC.
rsouza@alunos.utfpr.edu.br
franciscoratusznei@gmail.com
marcos.jurandir@yahoo.com.br
joaoosorio1@hotmail.com
f.xavier@ufsc.br

Resumo. A deposição de ligas resistentes a corrosão e ao desgaste através do processo LASER cladding na preparação e / ou reparo de componentes submetidos a condições severas de operação tem sido um desafio de centros de pesquisas. As superligas de Ni tem encontrado boa aplicabilidade para estas situações, por oferecerem resistência a variados mecanismos de desgaste, inclusive em altas temperaturas. O LASER cladding, por sua vez, apresenta vantagens em relação a outros processos de deposição, como a geração de revestimentos com boa adesão metalúrgica, baixa diluição e pequenas zonas afetadas pelo calor (ZAC). Neste intento, o presente trabalho apresenta um levantamento de algumas pesquisas que empregam o LASER cladding na aplicação de revestimentos de Inconel 625 sobre variados materiais de substrato e diferentes parâmetros de deposição. Além disso, apresenta-se um estudo de caso prático quanto a influência de diferentes parâmetros de deposição desta liga. A partir destas, foi possível traçar um perfil da aplicabilidade desta liga e os efeitos da variação de parâmetros sobre a qualidade e resistência dos revestimentos. Os resultados obtidos revelam que o elevado grau de controle propiciado pelo LASER cladding, aliado as características do Inconel 625, resultam em revestimentos de alta qualidade, aumentando o tempo de vida de componentes sujeitos a condições severas de desgaste, especialmente aos mecanismos de abrasão e corrosão.

Palavras chave: LASER cladding. Inconel 625. Abrasão. Corrosão. Parâmetros.

1. INTRODUÇÃO

Os mecanismos de oxidação, corrosão e erosão em ambientes de altas temperaturas e umidade causam desperdícios financeiros e reduzem o tempo de vida de componentes em diversos campos da engenharia, como na geração de energia, indústria de papel e petroquímica. Estes componentes trabalham em ambientes com a presença de fluidos corrosivos como água do mar, sulfatos, cloretos e gases. Desta forma, a aplicação de revestimentos resistentes a estes mecanismos na produção de novos e remodelados componentes desgastados vem sendo adotada como uma alternativa de sucesso (TUOMINEN *et al.*, 2003).

Um dos materiais mais utilizados para revestimentos resistentes a corrosão são as ligas a base de Ni (níquel), devido à sua alta performance em ambientes agressivos. O Inconel 625 é uma liga utilizada em diferentes aplicações por sua resistência a corrosão, inclusive em altas temperaturas. Sua alta resistência a tração, deformação e ruptura a torna uma escolha interessante para componentes aeroespaciais (VERDI *et al.*, 2014).

Esta liga é comumente depositada por técnicas de aspersão térmica. No entanto, outros métodos foram explorados para reduzir problemas como alta diluição, falta de adesão metalúrgica entre substrato e revestimento e extensas zonas afetada pelo calor (ZAC). O LASER cladding tem se mostrado uma boa alternativa neste sentido (VERDI *et al.*, 2017).

Diversas pesquisas têm sido realizadas sobre revestimentos de Inconel 625 depositados via LASER cladding. Al-fadhli *et al.* (2006) demonstraram que esta possui alta resistência a corrosão e alta ductilidade, fator que a tornou uma boa escolha em modificações de superfícies de componentes na indústria de óleo e gás. Tuominen *et al.* (2003) investigaram o desempenho eletroquímico dos revestimentos de Inconel 625 depositados por HVOF e LASER cladding em meio corrosivo. Concluíram que o revestimento depositado por este último apresentou maior resistência a corrosão. Além destas, várias outras pesquisas foram executadas comparando processos de deposição de Inconel 625. A partir dos resultados, de modo geral, o desempenho da liga depositada por LASER cladding é superior (TUOMINEN *et al.*, 2003; VERDI *et al.*, 2014; VERDI *et al.*, 2017; AL-FADHLI *et al.*, 2006; TUOMINEN *et al.*, 2003; ABIOYE; MCCARTNEY; CLARE, 2015; MAHMOOD; STEVENS; PINKERTON, 2012).

Com base neste princípio, este artigo apresenta uma revisão do comportamento e das particularidades de revestimentos de Inconel 625 depositados pelo processo LASER *cladding*, nos quais variou-se o parâmetro de potência do feixe LASER. Além disso, apresenta-se um estudo dos autores deste com o mesmo sentido. Deste modo, tem-se como objetivo compreender o cenário atual de aplicabilidade desta tecnologia e dos parâmetros que a governam, visto que esta possui excelentes perspectivas de crescimento, tanto pela demanda do mercado como pelas características intrínsecas do processamento a LASER.

2. METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, realizou-se os seguintes passos:

- Passo 1 - Realizou-se uma pesquisa introdutória sobre o mecanismo de corrosão em materiais de engenharia e os principais métodos de prevenção deste.
- Passo 2 - Abordagem de conceitos da tecnologia LASER *cladding* e os parâmetros de deposição mais importantes.
- Passo 3 - Breve levantamento bibliográfico de trabalhos que avaliaram o desempenho de revestimentos de Inconel 625 depositados por LASER *cladding*, destacando a influência do parâmetro potência de feixe LASER.
- Passo 4 - Apresentação do estudo de caso prático dos autores deste.
- Passo 5 - Apresentação das conclusões obtidas a partir dos resultados da literatura e do estudo de caso dos autores deste.

3. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA TECNOLOGIA LASER CLADDING

A técnica LASER *cladding* utiliza uma fonte de calor proveniente de um feixe LASER para depositar e fundir uma camada de material (na forma de pó ou arame) por sobre um substrato de menor resistência mecânica. A cinemática é geralmente controlada por comando numérico computadorizado (CNC) (LIU *et al.*, 2017). Para gerar revestimentos de boa qualidade, é necessário se ter um controle rigoroso dos parâmetros de deposição. Neste intuito, diversos trabalhos são realizados visando a otimização destes parâmetros, que também está diretamente relacionada a aplicação específica.

As características mais importantes do processo, como a altura e a largura das trilhas, microestrutura, ângulo de contato e diluição, dependem fortemente dos parâmetros de deposição, que incluem a potência do feixe LASER, velocidade de varredura, taxa mássica de alimentação de pó, tamanho de partícula de pó, diâmetro focal, distância de feixe no foco, tipo e vazão de gás de proteção e transporte. Dentre os citados, os três primeiros são apontados na literatura como sendo os de maior influência (VERDI *et al.*, 2017).

4. INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO POTÊNCIA DE FEIXE LASER

Abioye; McCartney; Clare (2013) revelaram a influência da potência de feixe LASER sobre uma liga de Inconel 625 depositada sobre substrato de aço AISI 304. A faixa utilizada foi de 1-1,8 kW com velocidade de varredura constante de 1,7 mm/s. A análise de microestrutura e EDX (Fig. 1) demonstrou que com o aumento da potência aumentou a diluição em média 8,0% em relação aos menores valores analisados. Este foi atribuído a maior quantidade de substrato fundido, fruto da densidade de energia mais elevada. O ângulo de contato, por sua vez, apresenta relação inversamente proporcional a taxa de diluição.

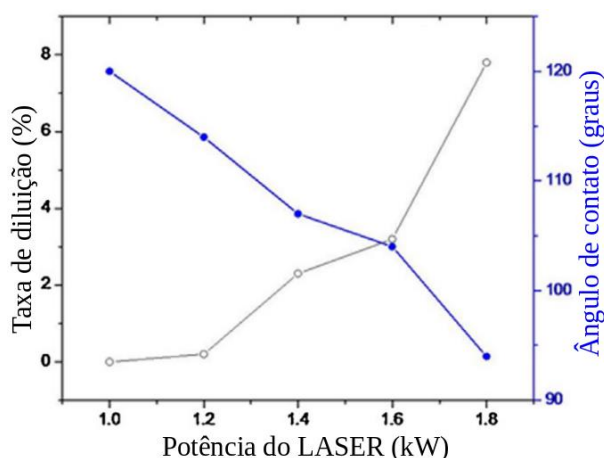


Figura 1 - Variação da diluição e do ângulo de contato com a potência do feixe LASER. Fonte: Adaptado de Abioye; McCartney; Clare (2013).

Abioye; McCartney; Clare (2013) demonstraram também que a relação de aspecto da trilha aumenta com o aumento da velocidade de varredura e da potência do feixe LASER, desde que outros fatores permaneçam constantes. A resposta da relação de aspecto pode ser explicada pelo volume do fio depositado por unidade de comprimento da trilha. Diminuindo a taxa de alimentação do fio e / ou aumentando a velocidade de varredura, reduz-se o volume depositado por unidade de comprimento, resultando em trilhas de altura reduzida (Fig. 2). No entanto, a largura deste se mostrou invariável com a variação do volume depositado. A relação de aspecto mais elevada, obtida com maiores potências, é explicada pelo efeito de achatamento, uma vez que a largura é o termo numerador nesta relação.

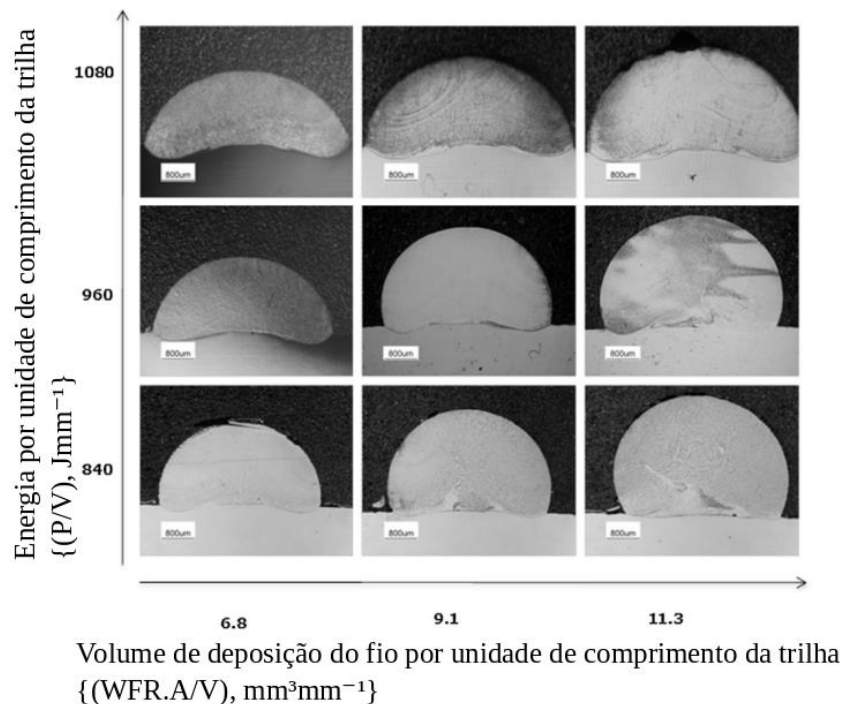


Figura 2 - Imagem ótica das seções transversais de trilhas de Inconel 625 depositados por LASER *cladding* a uma velocidade de varredura de 1,7 mm/s. Fonte: Adaptado de Abioye; McCartney; Clare (2013).

Gao; Zhou; Xi, (2011) realizaram diversos experimentos de deposição de Inconel 625 sobre substrato de aço AISI 1045 para entender os efeitos dos principais parâmetros de deposição. Os autores mostraram que, com o aumento da potência do feixe laser, ocorre uma redução da altura do revestimento, enquanto a largura aumenta com a alteração da velocidade de varredura. A taxa mássica de alimentação de pó afetou de maneira não uniforme a geometria do revestimento.

Mahmood; Stevens; Pinkerton (2012) pesquisaram a influência de parâmetros de processo sobre a resistência a corrosão de Inconel 617 sobre substrato de aço EN-43A. Analisou-se geometria e microestrutura. A Fig. 3 mostra o perfil transversal das trilhas (alta potência, HP - 1,2 kW) e (baixa potência, LP - 0,8 kW). A espessura da camada aumentou com a potência, devido a uma área crescente da poça de fusão. Destacou-se que os parâmetros de maior volume por unidade de comprimento surgiram pequenas regiões de falta de fusão com o substrato. A penetração das camadas aumentou com a potência de feixe LASER.



Figura 3 - Perfis das camadas de revestimento: alta potência (HP) e baixa potência (LP). Fonte: Adaptado de Mahmood *et al.* (2012).

Fujishima *et al.*, (2017) pesquisaram a influência da potência do feixe LASER sobre uma liga de Inconel 625 em três níveis: 1,2 kW; 1,6 kW e 2,0 kW. Os resultados mostraram que, em ambos os casos, tanto com deposição de única como de múltiplas camadas, a porosidade reduziu à medida que a potência foi elevada. O valor mais baixo da faixa avaliada gerou maior variação no grau de severidade destas discontinuidades, conforme ilustra a Figura 4.

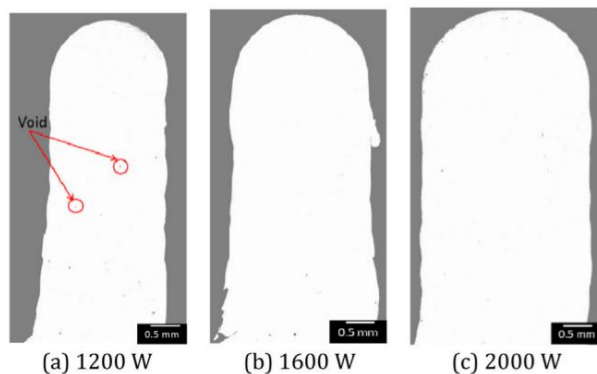


Figura 4 - Variação na severidade das porosidades segundo a potência do feixe LASER. Fonte: Fujishima *et al.* (2017)

5. ESTUDO DE CASO

Os resultados apresentados nos gráficos da Fig. 5 e Fig. 6 são frutos de um experimento prático do grupo deste trabalho. Foi realizada a deposição de uma liga de Inconel 625 variando a potência do feixe LASER em seis níveis (350,0; 700,0; 1050,0; 1400; 1750,0 e 2000,0 W) e a velocidade de varredura em quatro níveis (300,0; 800,0; 1300,0 e 1800,0 mm/min), enquanto os demais parâmetros (como taxa mássica de alimentação de pó - 11,2 g/min e vazão de gás Ar - 15,0 l/min) foram mantidos constantes. O objetivo deste é avaliar os efeitos dos parâmetros variados sobre as características geométricas de altura e largura das trilhas de revestimento.

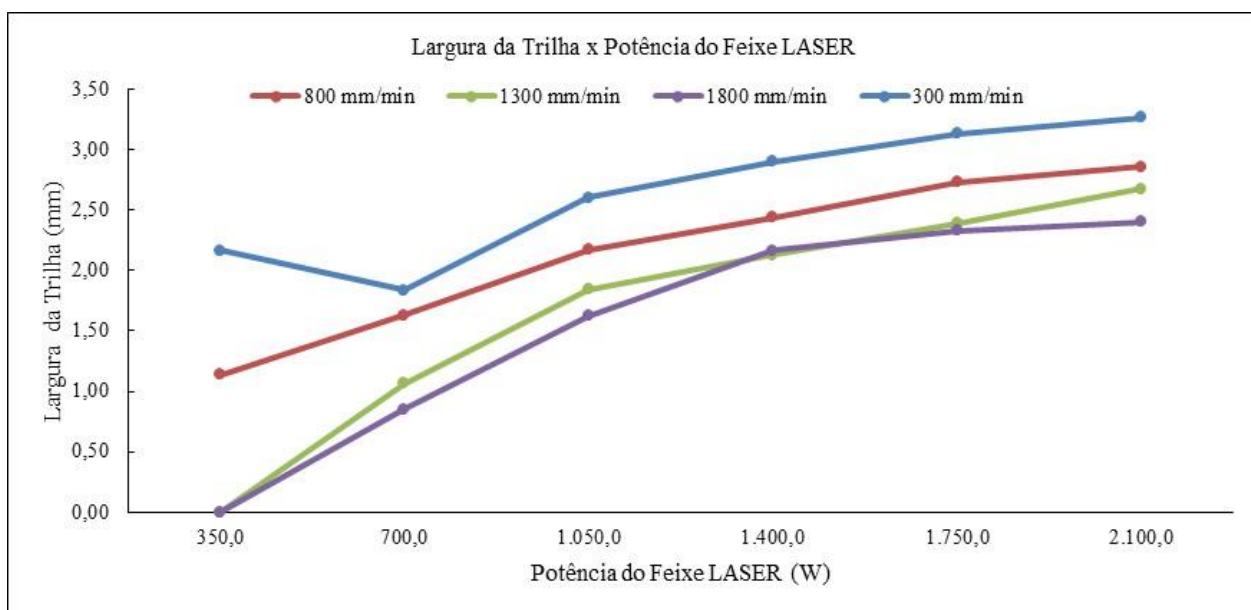


Figura 5 - Variação da largura das trilhas segundo a potência do feixe LASER.

De modo geral, os resultados da Fig. 5 concordam com os estudos de Gao; Zhou; Xi, (2011) os quais demonstram que a largura dos cordões aumenta em função do aumento da potência. A velocidade de varredura também exerce influência, sendo que quanto maior a velocidade, menor tende a ser a largura dos cordões. Uma das hipóteses para o aumento da largura é a diminuição da tensão superficial e do ângulo de contato em razão do aumento da temperatura. Entretanto, os gráficos de Gao; Zhou; Xi, (2011), que aqui não foram explicitados por razões de espaço, não mostram tão claramente a tendência assintótica da largura do cordão - sugerindo uma relação exponencial entre a largura do cordão e a potência do feixe laser. A primeira hipótese para este fato é o tipo da escala gráfica usada por Gao; Zhou; Xi, (2011), em segundo lugar, a largura da faixa, que foi de 800W a 1800W estreita o suficiente para mascarar este efeito. A Figura 5 apresenta um resultado mais próximo da realidade, pois a largura do cordão, evidentemente, não pode aumentar

indefinidamente. Por fim, Gao; Zhou; Xi, (2011) utilizaram uma velocidade de varredura de 180 mm/min a 300 mm/min, consideravelmente menor que as velocidades aplicadas nos testes da Fig. 5.

Os mesmos comentários são válidos para a Fig. 6, nos gráficos de Gao; Zhou; Xi, (2011), a altura dos cordões simplesmente diminui em função da potência, entretanto, a Fig. 6 apresenta um comportamento um pouco diferente em uma escala mais larga de parâmetros. É importante destacar, assim como ressaltado na Fig. 5, a influência da velocidade de varredura. Porém, neste caso, menores velocidades de varredura tendem a gerar cordões de maior altura. A altura dos cordões diminui para um certo intervalo, mas se acomoda depois de certos valores, não descaindo indefinidamente como mostram Gao; Zhou; Xi, (2011). É válido mencionar que para a potência de 350W, a altura é zero, fato que indica que não houve potência suficiente para fundir todo o material adicionado e permitir a leitura. Sendo assim, apenas os valores a partir de 700W devem ser considerados para efeito de comparação.

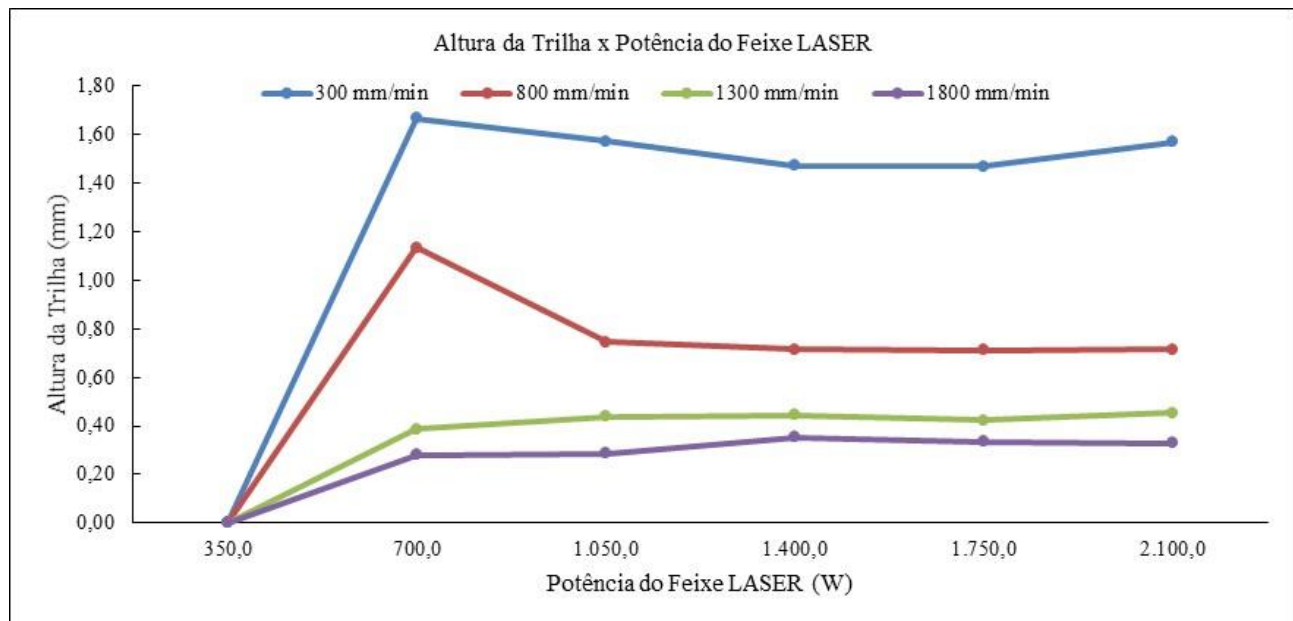


Figura 6 - Variação da altura das trilhas segundo a potência do feixe LASER.

6. CONCLUSÕES

A partir do cenário observado durante a realização deste artigo, algumas conclusões podem ser inferidas:

- É possível observar, a partir de vários resultados de outros autores, que a técnica LASER *cladding* oferece diversas vantagens em relação a outros processos de revestimento, fator que, aliado as características intrínsecas da liga Inconel 625, resultam em revestimentos de alta qualidade.
- A baixa diluição, menor ZAC e expressiva redução de defeitos e / ou discontinuidades são exaustivamente apontadas como vantagens da técnica.
- A alta resistência a corrosão, inclusive em elevadas temperaturas, são pontos chaves das ligas de Inconel, fator que a torna tão interessante para aplicações industriais em ambientes severos.
- A liga em questão também se mostrou apta para aplicações que combinam variados mecanismos de desgaste atuando de forma mútua.
- Os parâmetros de deposição potência de feixe LASER e velocidade de varredura mostraram-se decisivos sobre as características geométricas das trilhas de revestimento.
- O aumento da potência tende a aumentar a largura dos cordões, por outro lado tende a diminuir a altura dos mesmos; que ficou claro nos testes realizados, bem como por outras fontes, somete deve-se destacar a diferença entre a tendência dos resultados, pois faixas muito estreitas de aplicação podem mascarar alguns dados.

7. REFERÊNCIAS

- Abioye, T.E.; McCartney, D.G.; Clare, A.T., 2013, "A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition", *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 213, pg. 2145-2151.
- Abioye, T.E.; McCartney, D.G.; Clare, A.T., 2015, "Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 217, pg. 232-240.

- Al-fadhli, H.Y.; Stokes, J.; Hashmi, M.S.J.; Yilbas, B.S., 2006, "The erosion and corrosion behaviour of high velocity oxy-fuel (HVOF) thermally sprayed Inconel-625 coatings on different metallic surfaces", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 200, pg. (20–21) 5782–5788.
- Fujishima, M.; Oda, Y.; Ashida, R.; Takezawa, K.; Kondo, M., 2017, "Study on factors for pores and cladding shape in the deposition processes of Inconel 625 by the directed energy deposition (DED) method", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 19, pg. 200-204.
- Gao, S.; Zhou, Y.; Xi, M., 2011, "Investigation on Inconel 625 Alloy ThinWalled Parts by Direct Laser Fabrication", *Advanced Materials Research*, Vol. 189-193, pg. 3687-3691.
- Mahmood, K.; Stevens, N.; Pinkerton, A. J., 2012, "Laser clad corrosion protection for mild and harsh environments", *Surface Engineering*, Vol. 28, Iss. 8, pg 576-584.
- Tuominen, J.; Vuoristo, P.; Mantyl, T.; Latokartano, J.; Vihinen, J.; Andersson, P.H., 2003, "Microstructure and corrosion behavior of high power diode laser deposited Inconel 625 coatings", *Journal of Laser Applications*, Volume 15, 55.
- Tuominen, J.; Honkanen, M.; Hovikorpi, J.; Vihinen, J.; Vuoristo, P.; Mantyla, T., 2003, "Corrosion Resistant Nickel Superalloy Coatings Laser-Clad with a 6 kW High Power Diode Laser (HPDL)", *First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing*, Proceedings of SPIE, Vol. 4831.
- Liu, J.; Yu, H.; Chen, C.; Weng, F.; Dai, J., 2017, "Research and development status of laser cladding on magnesium alloys: A review", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 93, pg. 195-210.
- Verdi, D.; Garrido, M.A.; Munez, C.J.; Poza, P., 2014, "Mechanical properties of Inconel 625 laser clad coatings: Depth sensing indentation analysis", *Materials Science & Engineering*, Vol. 598, pg. 15–21
- Verdi, D.; Garrido, M.A.; Munez, C.J.; Poza, P., 2014, "Microscale evaluation of ' laser clad Inconel 625 exposed at high temperature in air", *Materials and Design*, Vol. 114, pg. 326–338.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

STUDY OF THE PARAMETERS INFLUENCE OF THE LASER CLADDING PROCESS IN THE INCONEL 625 ALLOY DEPOSITION

Ricardo Delgado de Souza¹
Francisco Ratusznei¹
Jurandir Marcos Sá de Sousa¹
João Victor El-Hage Meyer Osório¹
Fábio Antonio Xavier¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/nº, Trindade-CEP 88040-900 Florianópolis-SC.
rsouza@alunos.utfpr.edu.br
franciscoratusznei@gmail.com
marcos.jurandir@yahoo.com.br
joaoosorio1@hotmail.com
f.xavier@ufsc.br

Abstract. The deposition of corrosion and wear resistant alloys by laser cladding process on the preparation or repair of component submitted to severe operation conditions is being a challenge to research centers. The Ni-based alloys found a large applicability on these applications, because it presents a great resistance to many wear mechanisms, including in high temperature environments. Laser cladding shows some advantages over conventional deposition processes, for instance, great metallurgical adhesion, low dilution and small heat affected zone (HAZ). In this sense, this article presents a researches review that applies INCONEL 625 on laser cladding coating over a variety of substrates and different parameters. Moreover, it is presented a practical study about the influence over many deposition parameters. At this point, it was possible to delineate an alloy applicability profile and the process parameters influence over the coating quality and resistance. The results shown the high control level provided by laser cladding, along with the INCONEL 625 characteristics, result on high quality coatings, increasing the industrial components lifetime subjected to severe conditions, specially abrasion and corrosion.

Keywords: Laser cladding, INCONEL 625, Abrasion, Corrosion, Parameters.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.