

OBTENÇÃO DOS LIMITES DE PROCESSO PARA LASER CLADDING COM PÓ PRÉ-DEPOSITADO DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L EM SUBSTRATO DE SAE 1020

Claudio Abilio da Silveira, claudio.silveira@posgrad.ufsc.br¹

Isadora Ferrari, isadora.ferrari@grad.ufsc.br¹

Wei Lin, wei.lin@posgrad.ufsc.br¹

Walter Lindolfo Weingaertner, w.l.weingaertner@ufsc.br¹

Milton Pereira, milton.pereira@ufsc.br¹

¹ Univesidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, Florianópolis - SC, 88040-900.

Resumo: *Cladding é um processo de revestimento que confere a um material de base uma superfície com características específicas. Sua utilização também é verificada no reparo de componentes de alto desempenho utilizados na indústria aeroespacial. O cladding pode ser obtido com utilização de laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) e deposição de material particulado sob a forma de pó. A alocação do material de revestimento junto à superfície pode ocorrer de forma simultânea à passagem do feixe laser ou por deposição prévia de uma camada de pó. Os parâmetros da camada pré-depositada e do feixe de laser são determinantes para a característica do revestimento. Neste contexto é apresentado um estudo experimental com objetivo de obter os limites operacionais, nos quais é possível alcançar condições favoráveis de cladding utilizando aço inoxidável AISI 316L pré-depositado sobre substrato de aço SAE 1020. É utilizado um laser de fibra com potência definida em 1500 W. A granulometria do material particulado está situada entre (50 e 150) μm . A metodologia aplicada baseia-se na variação de parâmetros de processo como velocidade, espessura da camada pré-depositada e diâmetro do feixe de laser para modificar as características morfológicas do revestimento obtido. São analisados valores de profundidade, altura e diluição do material depositado sob a forma de cordões isolados. Os resultados demonstram que a alteração dos parâmetros de processo como o aumento da velocidade reduz a penetração do cordão no substrato, porém contribui para formação de ângulos de contato obtusos. Tanto maior o diâmetro do ponto focal, menores são os valores de diluição do material depositado sobre o substrato. No entanto, condições específicas resultam na instabilidade da forma do revestimento indicando os limites operacionais do processo para a infraestrutura utilizada.*

Palavras-chave: *laser cladding, ANSI 316L, SAE 1020, pó, pré-depositado.*

1. INTRODUÇÃO

Os processos de *cladding* ou deposição de metal com *laser* (*Laser Metal Deposition* - LMD) são técnicas que permitem aplicar um revestimento sob um substrato (Poprawe, 2011). As características específicas deste revestimento buscam melhorar o desempenho do componente frente a intempéries aos quais o substrato é mais sensível. Esta combinação entre revestimento e substrato permite obter características estratégicas na superfície aliadas a um material estrutural que resulta em melhor custo-benefício.

Uma das principais aplicações de revestimento a *laser* pela indústria tem o intuito de conferir resistência ao desgaste e proteção contra corrosão e oxidação em superfícies metálicas. A deposição de metais com *laser* também atua na reparação e substituição de componentes de alto valor agregado, como componentes para turbinas de aviões e componentes de uso militares.

Quando aplicado em sucessivas camadas o *cladding* configura-se como uma tecnologia de manufatura aditiva que permite a construção de objetos a partir de um modelo 3D computacional (American Society for Testing and Materials, 2012). Nos últimos anos os avanços obtidos têm potencializado as aplicações de processos de deposição com *laser* na prototipagem de peças metálicas, produção de componentes complexos/customizados e na reparação em locais remotos (Thompson et al., 2015).

Os métodos de entrega do material de revestimento são variados, no entanto, o enfoque deste artigo recai sobre a utilização de materiais na forma de pó, depositados previamente na forma de uma camada com espessura e distribuição homogêneas. Dentre as propriedades da adição de materiais particulados com *laser* cita-se a baixa porosidade, baixa distorção, baixo aporte térmico e boa adesão entre o material depositado e o substrato (Poprawe, 2011).

Os parâmetros variados são resumidos em: espessura da camada de pó pré-depositado; velocidade de avanço; posição relativa entre o ponto focal do *laser* e superfície da amostra. Os resultados são avaliados com base na análise metalográfica dos cordões individualmente depositados de aço inoxidável AISI 316L sobre o substrato do aço SAE 1020. Os aspectos analisados são: altura, largura, profundidade de penetração, diluição, tempo de interação e energia inserida por unidade de área. As características destes cordões permitem influir sobre os limites nos quais o processo mantém estabilidade suficiente para conferir um *cladding* regular e com características desejáveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO

A deposição deste material particulado sobre a superfície do substrato pode ser feita, basicamente, de duas formas por processos que apresentam duas etapas distintas ou uma única etapa (Khajepour et al., 2004). Quando o processo ocorre em duas etapas, estas compreendem a aplicação de uma camada de revestimento e posteriormente a irradiação do *laser*, como ilustra a Fig. (1)a. Durante o processo ocorre a formação de uma poça de fusão na superfície do pó pré-aplicado devido à radiação do feixe de *laser*. A poça fundida se expande para interface com o substrato por condução de calor e em seguida ocorre a penetração no substrato, promovendo a ligação entre ambos.

No processo de uma única etapa o material de revestimento é alimentado na poça de fusão formada pela irradiação do *laser*. Esse material pode ser na forma de pasta (Fig. (1)b1), injeção de pó (Fig. (1)b2) ou na forma de arame (Fig. (1)b3). Independentemente do tipo de sistema de entrega, a alimentação do material de adição ocorre na presença do *laser*, caracterizando uma única etapa no processo.

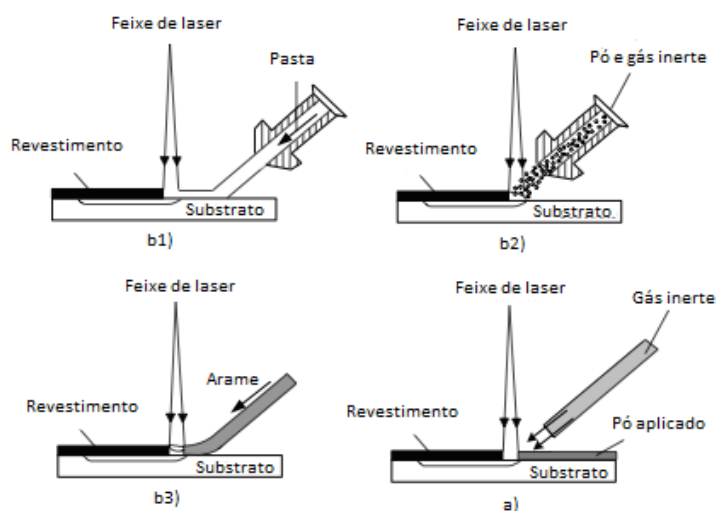


Figura 1. Esquemático dos diferentes métodos de *laser cladding*: a) processo de duas etapas e b) processo de uma etapa com aplicação do material por: b1) pasta, b2) pó e b3) arame. Adaptado de (Khajepour et al., 2004).

As principais variáveis do processo de revestimento a *laser* são: as características do feixe (potência, diâmetro do feixe e velocidade de deslocamento); as propriedades dos materiais (tanto dos substratos como dos revestimentos) e os parâmetros de processamento (geometria do componente, taxa de alimentação, presença de gás de proteção) (Ion, 2005). Essa variedade de parâmetros e também de fenômenos físicos determinam o resultado final. As variáveis envolvidas podem ser correlacionadas entre si para fornecer informações adicionais como a energia fornecida por unidade de área e o tempo de interação (Emamian et al., 2011).

A energia fornecida por unidade de área – E [J/mm²] – determinada pela Eq. (1) exprime o valor de energia entregue para o material particulado e do substrato. Onde P corresponde a potência do *laser* [W], V a velocidade relativa entre o *laser* e a amostra [mm/s] e D o diâmetro do feixe de *laser* que incide sobre o material [mm].

$$E = \frac{P}{V \cdot D} \quad (1)$$

O tempo de interação entre o feixe de *laser* e o material – T [s] – é definido como o quociente do diâmetro do feixe (D) que incide sobre o material [mm] pela velocidade de varredura (V) [mm/s], como apresentado pela Eq. (2).

$$T = \frac{D}{V} \quad (2)$$

Para analisar a influência dos parâmetros que podem ser variados durante o processo é importante identificar, também, a qualidade do cordão de solda através de alguns fatores relevantes como diluição e ângulo de contato.

A diluição é considerada como sendo uma porcentagem da mistura do substrato com a região do revestimento ocasionada por convecção. Uma pequena quantidade de substrato deve ser fundida a fim de formar uma forte ligação metalúrgica. A diluição com cerca de 5 % já garante uma fusão eficiente (Ion, 2005). Uma diluição igual a zero corresponderia a uma situação com ausência de contaminação do revestimento. Já em situações em que a diluição da superfície solidificada é superior a 20 % o processo designa-se por "Alloying" (Reis et al., 1998).

Determinados modelos teóricos para *laser cladding* por pó pré-aplicado mostram a relação entre o tempo de interação com a formação da poça fundida (Powell et al., 1988). Os resultados mostraram que a diluição aumentava com o aumento do tempo de interação (por redução da velocidade de processo). Outras características do processo podem alterar a diluição, como por exemplo, elevadas potências do *laser* acentuam uma excessiva diluição, a condutividade térmica do substrato também pode influenciar, bem com a diminuição dos valores de pó depositado que levam ao aumento da diluição (Souto, 2013).

A diluição $D(\%)$ pode ser definida de forma geométrica a partir da Eq. 3, onde $A(1)$ é a área acima da superfície do substrato [mm^2] e $A(2)$ é a área da penetração no substrato [mm^2].

$$D(\%) = \frac{A(2)}{A(1) + A(2)} \cdot 100 \quad (3)$$

O ângulo de contato é um parâmetro associado a qualidade do revestimento. Em geral, há três tipos de seções transversais que podem ser produzidas por *laser cladding*. Para um revestimento sem porosidade o ângulo de contato, representado na Fig. (2) como α , deve ser agudo, com o intuito de proporcionar uma maior aderência entre o substrato e o revestimento. É preferível que apenas uma porcentagem pequena do substrato seja fundida, mas que garanta ainda uma boa ligação entre os dois materiais, como representado na Fig. (2)a. Já na Fig. (2)b, por mais que o ângulo de contato seja agudo, a diluição tornou-se exagerada, devido à energia necessária para fundir o material de adição ser excessiva. A Fig. (2)c mostra um ângulo obtuso, representando que a energia fornecida foi insuficiente para promover a fusão do material de adição com o material de base (Steen and Mazumder, 2010).

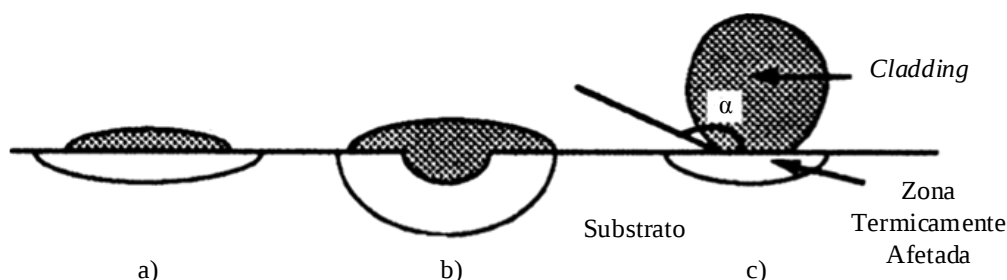


Figura 2. Três seções transversais de um revestimento simples por *laser cladding*. Fonte: adaptado de (Steen and Mazumder, 2010).

Além do ângulo de contato, outros itens na geometria do revestimento variam de acordo com a mudança dos parâmetros do processo. A seção transversal do cordão resultante pode ser avaliada em termos de altura do revestimento (h), largura do revestimento (W), ângulo de contato (θ), profundidade do revestimento (b) e porcentagem de diluição (calculada pelas áreas $A(1)$ e $A(2)$), como exposto na Fig. (3). A profundidade de penetração do revestimento irá representar a espessura do substrato fundido durante o *cladding* adicionado à região de revestimento (Khajepour et al., 2004).

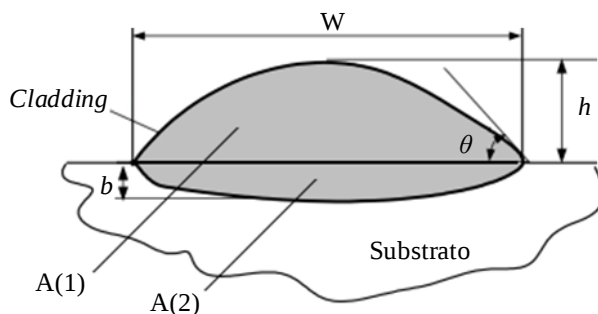


Figura 3. Seção transversal do revestimento. Fonte: adaptado de (Khajepour et al., 2004).

Outras variáveis encontradas no processo de interação entre *laser* e material particulado, tais como, a direção de construção e taxa de sobreposição dos cordões de *cladding* também apresentam influência sobre o resultado final (Hanzl et al., 2015). Os fenômenos fluídicos e térmicos influenciam na solidificação da poça de fusão e consequentemente nas características da microestrutura, tensão residual e propriedades mecânicas (Sun et al., 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A fonte *laser* utilizada nos experimentos é fabricada por IPG Photonics, modelo PS-YLS-10000, com emissão contínua e comprimento de onda de 1064 nm. O sistema de condução do feixe consiste em uma fibra óptica com diâmetro de 400 μm . O cabeçote óptico, fabricado por Precitec, é formado por uma lente colimadora com distância focal de 150 mm e uma lente de foco de 300 mm. Em função das características ópticas do sistema e dados experimentais considera-se que o diâmetro do feixe de *laser* na posição de foco é aproximadamente 0,8 mm. O sistema de movimentação cartesiana é composto por três eixos comandados numericamente.

O material de adição, pó de aço inoxidável AISI 316L com granulometria entre (50 e 150) μm foi depositado sobre a superfície de um substrato de baixo teor de carbono, aço SAE 1020, com espessura de 9,5 mm. A superfície do substrato foi preparada através da jateamento, técnica que permitiu remover contaminações e oxidações presentes. Durante o ensaio a amostra foi posicionada em um recipiente preenchido com gás de proteção (argônio) para formar uma atmosfera inerte. Nenhum fluxo de gás de proteção é direcionado contra a camada de pó a fim de evitar perturbações no posicionamento do material particulado.

A formação de uma camada controlada para o ensaio tem início com o acúmulo do pó de aço inoxidável AISI 316L sobre uma das extremidades da placa que compõe o substrato. Uma lâmina de vidro com uma das laterais planificada por processo de lapidação é utilizada como nivelador. A altura da camada desejada é determinada por dois conjuntos de calibres de folga sobre os quais o nivelador é deslizado. Ao deslocar o material particulado uma camada preenche o espaço existente entre a superfície do substrato e o nivelador. O pó remanescente após aplicação do feixe de *laser* não foi devolvido ao estoque de material utilizado nos ensaios subsequentes, devido à sua contaminação pelo processo.

Parte dos experimentos são baseados na variação da velocidade de avanço para três espessuras de camada pré-depositada. Para espessuras de 0,5 mm, 1,0 mm, e 1,5 mm foram utilizadas velocidades de avanço que iniciam em 0,5 m/min e se estendem até 4,0 m/min. A posição relativa entre o cabeçote e a amostra é tal que o diâmetro do feixe de *laser* (*spot size*) incidente é aproximadamente 0,8 mm. Nesta condição o ponto focal (no qual o feixe de *laser* apresenta menor diâmetro) coincide com a superfície do pó pré-depositado. A Tab. (1) resume os parâmetros utilizados nos ensaios de variação da velocidade de avanço e espessuras de pó sobre o substrato.

Tabela 1. Parâmetros utilizados nos ensaios com variação da velocidade de avanço em diferentes espessuras de pó pré-depositado.

Parâmetros	Valores utilizados
Espessura pré-depositada (mm)	0,5; 1,0; 1,5
Velocidade de avanço (m/min)	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0
Potência (W)	1500

Os ensaios de variação da posição focal relativa foram realizados promovendo o deslocamento do cabeçote em relação a amostra. O referencial adotado considera que quando o ponto focal do *laser* (local onde o diâmetro do feixe é mínimo ao longo da direção de propagação) coincide com a superfície do material pré-depositado a posição focal relativa é zero. Devido à característica imposta pela óptica do cabeçote o feixe de *laser* diverge à medida que se afasta do ponto focal. Consequentemente, quando o ponto de foco do feixe é deslocado em relação à amostra ocorre uma mudança no diâmetro do feixe de *laser* que atinge a superfície do material. O deslocamento ou posição focal relativa com sinal positivo corresponde ao afastamento do cabeçote em relação à amostra. A Tab. (2) apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios de variação da posição focal relativa.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nos ensaios com variação da posição focal relativa e em diferentes velocidades de avanço.

Parâmetros	Valores utilizados
Posição focal relativa (mm)	+30; +45; +60; -60
Espessura pré depositada (mm)	0,5
Velocidade de avanço (m/min)	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
Potência (W)	1500

Após a aplicação do feixe de *laser* se observou os resultados de cada ensaio e os cordões que, visualmente, apresentaram continuidade na sua construção foram seccionados transversalmente para uma posterior análise macroscópica. A preparação metalográfica envolveu o desbaste das amostras embutidas, utilizando lixas de SiC com granulometrias P80, P120, P220, P320, P400, P600 e P1200 nesta respectiva ordem. Uma suspensão de alumina, com granulometria de 1,0 μm , foi utilizada para o polimento. No ataque químico das amostras, para contrastar o material de base do material de adição, foi empregada solução de Nital com concentração de 2 %. As amostras foram analisadas no estereoscópio STEM SV8 e as dimensões dos cordões foram calculadas através do software imageJ.

4. RESULTADOS

Os itens a seguir apresentam os resultados quantitativos e visuais obtidos a partir do processamento das imagens das macrografias para os dois métodos de ensaio adotados. Somente as velocidades nas quais os cordões obtiveram características homogêneas são apresentadas.

4.1. Variação da espessura pré-depositada e velocidade de avanço

Os ensaios, separados inicialmente pelo valor de espessura da camada pré-depositada e subdivididos pelas velocidades utilizadas, têm expostos os valores obtidos em cordões que apresentaram continuidade na fusão das partículas. Acima da velocidade de avanço de 3,0 m/min não foi possível obter cordões em que a seção transversal analisada correspondesse ao comportamento do revestimento ao longo da deposição.

A Tab. (3) apresenta os resultados obtidos na análise das macrografias originadas do ensaio com espessura pré-depositada de 0,5 mm de aço inoxidável AISI 316L sobre o substrato SAE 1020 e potência de *laser* de 1500 W. As imagens das macrografias que originaram os resultados obtidos neste ensaio podem ser observadas na Fig. (4).

Tabela 3. Resultados da geometria dos cordões de *cladding*, espessura pré-depositada de 0,5 mm.

	0,5 m/min	1,0 m/min	1,5 m/min	2,0 m/min	2,5 m/min	3,0 m/min
Profundidade (mm)	0,96	0,71	0,56	0,45	0,36	0,32
Altura (mm)	0,74	0,66	0,37	0,38	0,32	0,49
E (J/mm ²)	225,00	112,50	75,00	56,25	45,00	37,50
Diluição (%)	55,96	47,06	59,97	53,25	50,62	36,91
Tempo de interação (s)	1,60	0,80	0,53	0,40	0,32	0,27
Largura (mm)	1,83	1,46	1,30	1,22	1,23	1,11

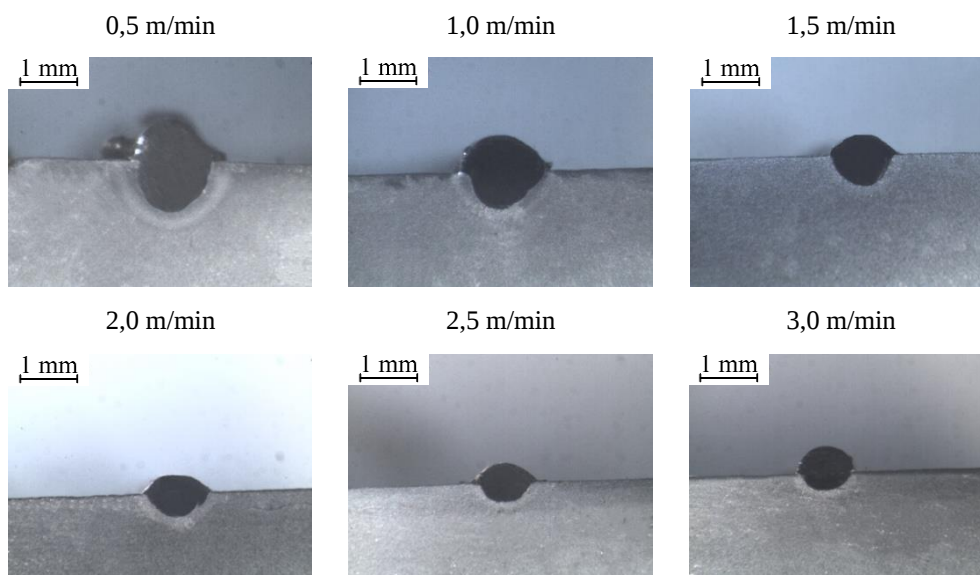


Figura 4. Macrografias dos cordões de *cladding* em diferentes velocidades, espessura pré-depositada de 0,5 mm.

Para o ensaio com espessura pré-depositada de 1,0 mm sobre o substrato os resultados são apresentados na Tab. (4) e as macrografias expostas na Fig. (5). Os ensaios que obtiveram condições regulares que possibilitassem a análise se limitaram até a velocidade de 2,0 m/min.

Tabela 4. Resultados da geometria dos cordões de *cladding*, espessura pré-depositada 1,0 mm.

	0,5 m/min	1,0 m/min	1,5 m/min	2,0 m/min
Profundidade (mm)	0,83	0,69	0,64	0,29
Altura (mm)	1,57	1,01	0,66	0,81
E (J/mm ²)	225,00	112,50	75,00	56,25
Diluição (%)	26,71	33,12	44,89	20,37
Tempo de interação (s)	1,60	0,80	0,53	0,40
Largura (mm)	1,93	1,51	1,18	1,05

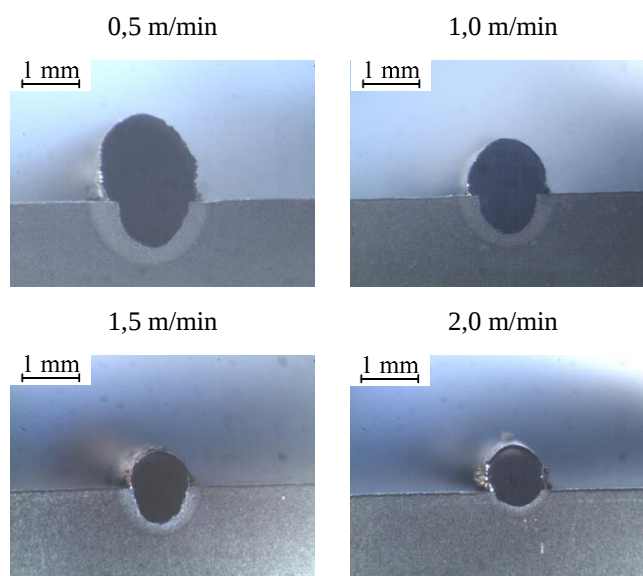


Figura 5. Macrografias dos cordões de *cladding* em diferentes velocidades, espessura pré-depositada de 1,0 mm.

Assim como observado na transição entre os ensaios anteriores, o aumento da espessura de pó pré-depositado para 1,5 mm provocou a redução da estabilidade do cordão em velocidades mais elevadas. A obtenção dos resultados extraídos do software de tratamento de imagem e das macrografias, estão respectivamente apresentados na Tab. (5) e na Fig. (6) e limitam-se as velocidades de (0,5 e 1,0) m/min.

Tabela 5. Resultados da geometria dos cordões de *cladding*, espessura pré-depositada de 1,5 mm.

	0,5 m/min	1,0 m/min
Profundidade (mm)	0,81	0,69
Altura (mm)	1,80	1,06
E (J/mm ²)	225,00	112,50
Diluição (%)	22,09	32,61
Tempo de interação (s)	1,60	0,80
Largura (mm)	1,90	1,38

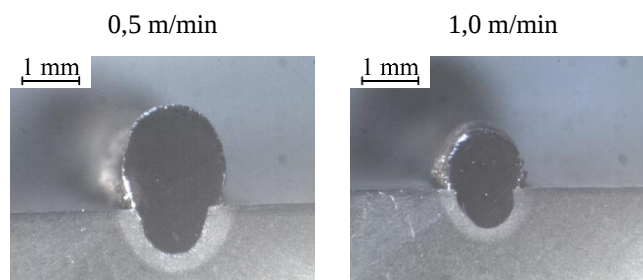


Figura 6. Macrografias dos cordões de *cladding* em diferentes velocidades, espessura pré-depositada de 1,5 mm.

A irradiação do *laser* começa a aquecer as partículas de pó na superfície. Essas partículas se fundem, e no estado fundido, podem conduzir calor para partículas vizinhas. Uma vez que as partículas fundidas tocam o substrato ocorre a perda de calor por condução. A formação de interface sólida-líquida por si só não penetra fortemente o substrato, no entanto, se o *laser* continuar a irradiar, a energia irá eventualmente passar essa interface e irá fundir a superfície do substrato. Os resultados demonstraram que a penetração diminuiu com o aumento da velocidade mesmo em diferentes espessuras de camada pré-depositada. Isso ocorreu juntamente pela redução da energia fornecida por unidade de área e redução do tempo de interação do feixe de *laser* com a amostra.

Mesmo com a redução da penetração pelo aumento da velocidade, os resultados obtidos ainda demonstraram uma alta profundidade de penetração e, consequentemente, altas diluições (acima de 20 %) em todos os cordões. Fato relacionado ao excesso de energia por unidade de área (J/mm^2) incidente sobre a amostra, dado o reduzido diâmetro do feixe de *laser*. Além disso, observa-se na maioria das imagens um ângulo de contato obtuso, não adequado ao revestimento por *laser cladding*.

Um dos requisitos para obtenção de um revestimento de boa qualidade é a possibilidade do material de revestimento fluir sobre o substrato, evitando os ângulos de contato obtusos. O comportamento do fluxo de material é melhorado pelo aumento da temperatura, que pode ser obtido com o aumento da energia fornecida por unidade de área. No entanto, os resultados anteriores revelam que as maiores taxas de energia inserida culminam em maiores profundidades atingidas no substrato.

Além da potência e velocidade, a energia fornecida por unidade de área apresentada na Eq. (1) é influenciada pelo diâmetro do feixe de *laser*. O efeito da variação da posição focal relativa e consequentemente da variação da mancha focal incidente sobre a amostra são expostos no item a seguir.

4.2. Variação da posição focal relativa

Nos ensaios com variação da posição focal a espessura utilizada para a camada pré-depositada de aço inoxidável AISI 316L foi 0,5 mm sob o substrato de SAE 1020. A opção por este valor dá-se pelo fato de ser a espessura na qual foi possível alcançar a maior faixa de velocidades, considerando a característica geométrica dos cordões depositados. A potência de *laser* utilizada foi 1500 W, assim como no ensaio anterior.

Os valores numéricos resultantes do processamento das imagens obtidas são apresentados na Tab. (6). Nela são apresentados os parâmetros de velocidade de avanço, profundidade, altura, diluição e largura dos cordões. São apresentadas somente as velocidades nas quais houve a formação de cordões homogêneos. Note que dois parâmetros até então apresentados foram suprimidos na Tab. (6). Como as informações técnicas sobre o diâmetro do feixe de *laser* fora da posição focal não foram experimentalmente comprovados não foi possível determinar os valores quantitativos da energia fornecida por unidade de área (E) e o tempo de interação para este tipo de ensaio.

Tabela 6. Resultados obtidos no software de imagem para diferentes posições focais relativas e velocidades de avanço. Espessura da camada pré-depositada de 0,5 mm.

(continua)							
	Posição focal relativa +30				Posição focal relativa +45		
Velocidade de avanço (m/min)	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5
Profundidade (mm)	0,65	0,45	0,28	0,24	0,17	0,10	0,05
Altura (mm)	0,92	0,90	0,91	0,98	0,90	1,08	1,25
Diluição (%)	30,13	24,53	17,90	13,79	11,38	3,33	1,54
Largura (mm)	2,72	2,31	1,92	1,57	3,07	2,77	2,17

(continuação)	Posição focal relativa +60		Posição focal relativa -60	
Velocidade de avanço (m/min)	0,5	1,0	0,5	1,0
Profundidade (mm)	0,03	0,02	0,04	0,03
Altura (mm)	0,85	0,98	0,82	0,90
Diluição (%)	0,002	0,008	0,003	0,007
Largura (mm)	3,23	2,75	3,02	2,40

Os experimentos de variação da distância focal foram realizados principalmente para observar o comportamento da profundidade de penetração no substrato e a largura do cordão. Em todas as condições de aumento do valor absoluto da posição focal relativa ocorreu sensível redução da profundidade de penetração, o que na condição +60 e -60 refletiu em uma diluição extremamente baixa. A largura do cordão aumentou de 1,83 mm para 2,72 mm (com avanço de 0,5 m/min) quando o sistema foi reposicionado para atingir a posição focal relativa +30, o comportamento se repetiu nos demais reposicionamentos.

O aumento do diâmetro no feixe de *laser* causa um aumento na área atingida pela radiação, o que faz com que a quantidade de energia, antes concentrada em menor área, se dissipe, e consequentemente diminua a densidade de

energia. Observa-se na Fig. (7) que este aumento do diâmetro do feixe *laser*, para as mesmas velocidades, melhora a molhabilidade entre os materiais, contribuindo ainda mais para a expansão do cordão sobre a superfície do substrato. Embora a profundidade tenha sido consideravelmente reduzida, a altura do cordão em relação ao substrato se mantém próxima na maioria dos casos, já que a espessura do pó estava definida pela sua deposição anterior a irradiação do feixe de *laser*.

Quando se observa a influência do aumento da velocidade de avanço nota-se que os parâmetros de profundidade, diluição e largura do cordão são reduzidos na grande maioria dos casos. A velocidade elevada contribui para a redução da energia inserida por unidade de área, associada diretamente a expansão da poça de fusão no material particulado, e consequentemente da quantidade e intensidade da deposição.

Os ensaios com posição focal relativa +60 e -60 tem com o objetivo particular verificar a hipótese de mudança na geometria do cordão e na forma de penetração na peça de trabalho com o ponto focal deslocado acima e abaixo da amostra. No entanto, não foi possível observar variação conclusiva devido a similaridade geométrica dos cordões obtidos até então.

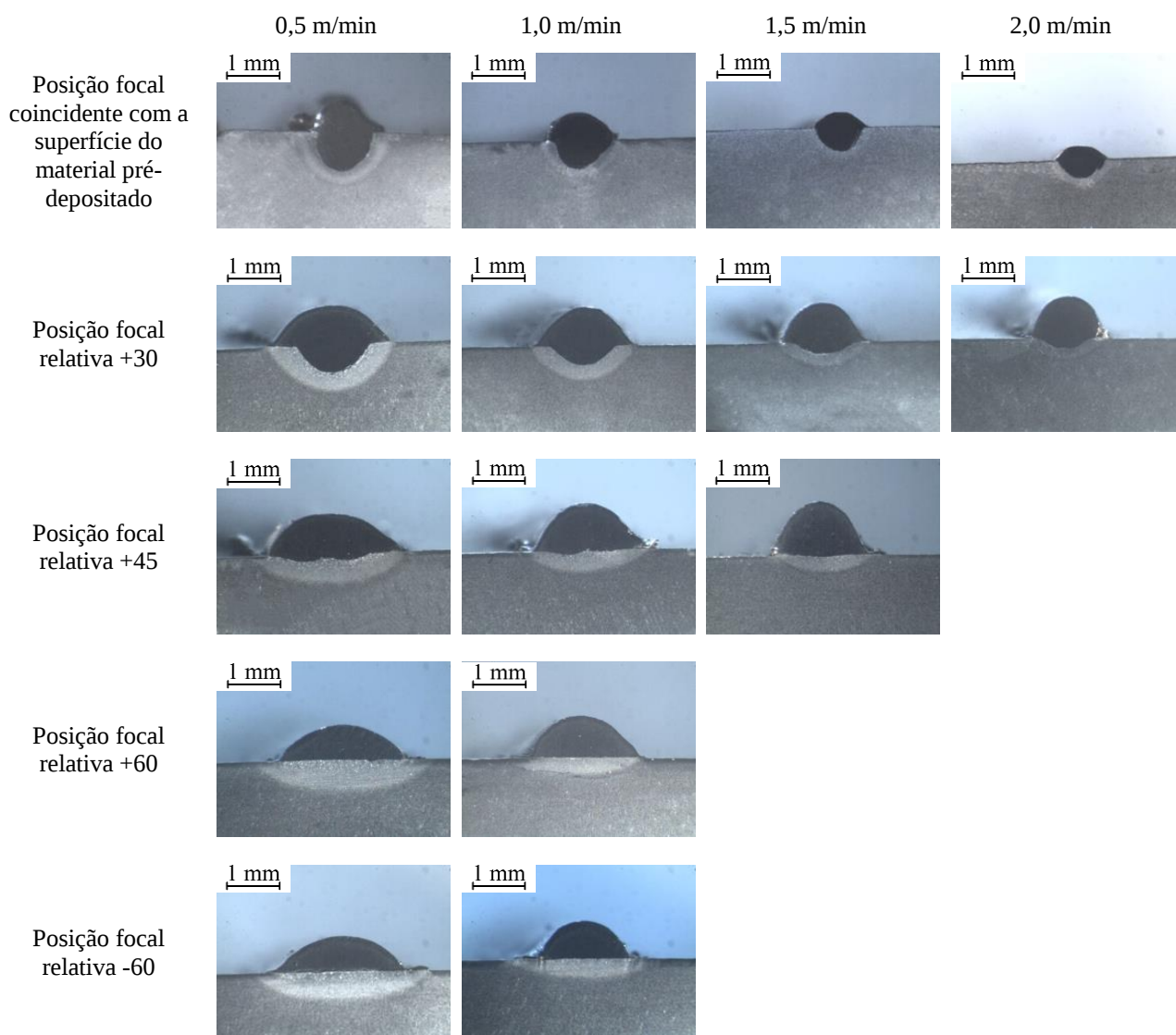


Figura 7. Evolução da geometria dos cordões em diferentes posições focais relativas, espessura pré-depositada de 0,5 mm e potência de 1500 W.

Assim como ocorrido no aumento da velocidade, o aumento no valor da posição focal relativa conduz a diminuição da energia entregue por unidade de área. O resultado é uma redução nos limites de processo, devido à baixa estabilidade alcançada pela poça de fusão. No caso da posição focal relativa +30 o limite de velocidade para deposições oriundas de camadas com 0,5 mm de pó pré-depositado é de 2,0 m/min, para +45 corresponde a 1,5 m/min. Este valor é reduzido a 1,0 m/min na posição focal relativa ± 60 .

5. CONCLUSÃO

Os ensaios realizados com diferentes espessuras de camada de pó de aço inoxidável AISI 316L sobre o substrato de aço SAE 1020, para diferentes velocidades de avanço e potência de *laser* de 1500 W apresentaram diferentes características de *cladding* conforme os parâmetros utilizados.

Os resultados obtidos mostram que o aumento da velocidade propicia uma menor penetração no substrato, no entanto a molhabilidade do revestimento com o material de base é prejudicada. O aumento da espessura do pó pré-depositado sobre o substrato (para potência de 1500 W e diâmetro da mancha focal de aproximadamente 0,8 mm) não demonstrou uma melhora na qualidade do revestimento, nem uma redução da penetração.

O aumento da espessura de pó pré-depositado diminui os limites de velocidade de avanço nos quais ainda é possível obter o *cladding*. Para as espessuras de camada com 0,5 mm, 1,0 mm e 1,5 mm as velocidades de avanços que resultaram em cordões homogêneos ficaram limitadas aos valores de 3,0 m/min, 2,0 m/min e 1,0 m/min, respectivamente.

Com o aumento da posição focal relativa entre o ponto focal do *laser* e a superfície da camada pré-depositada observa-se um aumento na largura do cordão, resultando em um ângulo de contato mais adequado e também redução da penetração no substrato. Observa-se também que não há diferenças entre o formato do cordão sobre a superfície para posições focais relativas 60 mm acima e abaixo do ponto focal. A diluição baixa, característica desejável no processo de *cladding*, também foi evidenciada com o aumento do diâmetro do feixe de *laser* incidente.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP - LASER) e do Instituto de Soldagem e Mecatrônica (LABSOLDA), ambos pertencentes a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) na realização deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. (2012), “ASTM F2792 - 12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies”, West Conshohocken, PA.
- Emamian, A., Corbin, S.F. and Khajepour, A. (2011), “The influence of combined laser parameters on in-situ formed TiC morphology during laser cladding”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 206 No. 1, pp. 124–131.
- Hanzl, P., Zetek, M., Bakša, T. and Kroupa, T. (2015), “The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts”, *Procedia Engineering*, Elsevier B.V., Vol. 100 No. January, pp. 1405–1413.
- Ion, J.C. (2005), *Laser Processing of Engineering Materials*, Butterworth-Heinemann, Oxford, available at:<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-075066079-2/50001-5>.
- Khajepour, A., Toyserkani, E. and Corbin, S. (2004), *Laser Cladding*, CRC Press, available at:<https://doi.org/10.1201/9781420039177>.
- Poprawe, R. (Ed.). (2011), *Tailored Light 2: Laser Application Technology*, 1st ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, available at:<https://doi.org/10.1007/978-3-642-01237-2>.
- Powell, J., Henry, P.S. and Steen, W.M. (1988), “Laser cladding with preplaced powder: Analysis of thermal cycling and dilution effects”, *Surface Engineering*, Vol. 4, pp. 141–149.
- Reis, M., Estanislau, S., Cabral, A., Peças, P. and Gouveia, H. (1998), “Revestimentos de cobre em aço inoxidável 304L por laser cladding”, *Revista de Metalurgia*, Vol. 34 No. 2, available at:<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.i2.680>.
- Souto, H.I.M. (2013), *Laser Cladding: Sua Aplicação À Deposição de Revestimentos Em Lâminas de Destroçadores de Madeira*, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP.
- Steen, W. and Mazumder, J. (2010), *Laser Material Processing*, 4th ed., Springer-Verlag London.
- Sun, S., Brandt, M. and Easton, M. (2017), “Powder bed fusion processes”, *Laser Additive Manufacturing*, Elsevier, pp. 55–77.
- Thompson, S.M., Bian, L., Shamsaei, N. and Yadollahi, A. (2015), “An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics”, *Additive Manufacturing*, Vol. 8, pp. 36–62.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste artigo.

OBTAINING THE PROCESS LIMITS FOR LASER CLADDING WITH PRE-DEPOSITED POWDER OF STAINLESS STEEL AISI 316L IN SUBSTRATE OF SAE 1020

Claudio Abilio da Silveira, claudio.silveira@posgrad.ufsc.br¹

Isadora Ferrari, Isadora.ferrari@grad.ufsc.br¹

Wei Lin, wei.lin@posgrad.ufsc.br¹

Walter Lindolfo Weingaertner, w.l.weingaertner@ufsc.br¹

Milton Pereira, milton.pereira@ufsc.br¹

¹ Univesidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, Florianópolis - SC, 88040-900.

Abstract: laser cladding technology is a coating process that provides specific characteristics to the surface of a base material. It can also be used in the repair of components, for example, in high performance aerospace industry. Cladding can be obtained using laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) and deposition of particulate material in powder form. The deposition of the coating material layer on the substrate surface either occur simultaneously to the passage of the laser beam, or occur by pre-placing a layer of powder on the base material. The pre-deposited layer and the laser beam parameters are decisive to achieve the desired coating characteristics. That been said, an experimental study is introduced to obtain possible operational limits to achieve favorable cladding conditions, using AISI 316L stainless steel pre-deposited on a SAE 1020 steel substrate. A fiber laser machine is used in this process and its power is set to 1500W; furthermore, the powder granulometry size is between 50-150 μm . The applied methodology to modify the coating morphological characteristics is based on the variation of process parameters, such as speed, pre-deposited layer thickness, and laser beam spot size. Depth, height and dilution values of the coating are analyzed in isolated tracks. In summary, the results demonstrated that changing process parameters, such as increasing speed reduces the penetration depth of welding, but contributes to the formation of obtuse wetting angles. In addition, the greater the spot size, the lower the dilution values of the material deposited on the substrate. However, specific conditions result in the instability of the coating form, which indicates the operation, limits of the process for the infrastructure used.

Keywords: laser cladding, ANSI 316L, SAE 1020, powder, pre-deposited.