

LASER CLADDING A PÓ DE AISI 316L EM SUBSTRATO DE SAE 1020 PARA PROTEÇÃO DE MAQUINÁRIO CONTRA CORROSÃO

Adriano de Souza Pinto Pereira, adriano.pereira@grad.ufsc.br¹

Milton Pereira, milton.pereira@ufsc.br¹

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

Jhonattan Gutjahr, j.gutjahr@posgrad.ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, Florianópolis – SC

Resumo: Proteger uma superfície metálica de um meio corrosivo é um problema comumente encontrado na fabricação de maquinário. Revestir tais superfícies com uma camada protetora é muitas vezes a solução mais econômica. Para tal, vários processos estão disponíveis, dos quais laser cladding a pó vem recentemente ganhando espaço nas linhas de produção. O objetivo deste trabalho é exemplificar a capacidade mencionada ao se depositar - por laser cladding a pó - uma camada protetora de AISI 316L sobre um substrato plano de SAE 1020. Foi empregado um cabeçote de deposição coaxial com saída de pó anelar em conjunto com um laser de fibra de até 10 kW. Parâmetros de processo foram testados em busca da menor diluição de cordão e do menor gasto de pó metálico possíveis, evitando a perda das propriedades anticorrosivas do material depositado e minimizando custos de processo. Para garantir que o substrato esteja completamente protegido a continuidade da camada depositada foi levada em consideração. Medições de microdureza Vickers, do revestimento, da poça fundida e da zona de difusão foram realizadas para avaliar a interface entre deposição e substrato. O processo estudado se apresenta como uma ferramenta de grande valia para a indústria de maquinários de grande porte ou de fabricação de dutos metálicos.

Palavras-chave: Laser Cladding a Pó; Proteção a Corrosão; AISI 316L.

1. INTRODUÇÃO

Laser cladding está localizado no grupo de processos de manufatura aditiva via laser ou LAM (*Laser Additive Manufacturing*). Este processo tem motivado e impulsionado uma série de desenvolvimentos e pesquisas, e, junto a outros processos LAM, tem causado uma verdadeira revolução na área de processos de fabricação. Uma possível tradução da palavra cladding para a língua portuguesa é a palavra revestimento. No entanto, cladding tem um entendimento mais amplo, abrangendo também processos de revestimento sem fusão do material de base, revestimento com formação de liga com o material de base e revestimento apenas com de difusão de elementos de liga no material de base (óxidos, nitretos e carbonetos). Durante o texto, foi padronizado o uso do termo em inglês.

O processo em questão consiste em depositar material, normalmente metálico, ao longo de uma trajetória predefinida enquanto deposição e substrato são unidos pelo aquecimento causado por um feixe laser. Os principais usos deste processo se resumem em, ao depositar camadas de material fundido, adicionar propriedades específicas à superfície do material de base ou visar o reparo de componentes danificados, reconstituindo tridimensionalmente, camada por camada, seu volume original (Poprawe, 2011 e Kaierle *et al.*, 2012). A restauração de pás de turbinas por laser cladding é uma das aplicações que mais se destaca (Schweitzer, 2015). Entre as vantagens que o processo de laser cladding vem apresentando destacam-se (Poprawe, 2011; Paydas *et al.*, 2015 e Ya *et al.*, 2015):

- a) Interação metalúrgica entre o material de adição e o substrato, ao contrário de outros processos como aspersão térmica etc.;
- b) Baixa porosidade e defeitos metalúrgicos nas camadas depositadas;
- c) Espessura das camadas depositadas entre 0,1mm e 1,5mm;
- d) Mínima deformação térmica da peça;
- e) Baixa diluição;
- f) Permite a utilização de diversas ligas e materiais.

A Figura (1) ilustra esquematicamente o princípio de funcionamento do processo. Existem várias configurações de sistemas que podem ser consideradas laser cladding, podendo este processo ser alimentado por arame ou pó. Aqui somente o processo de laser cladding a pó será abordado.

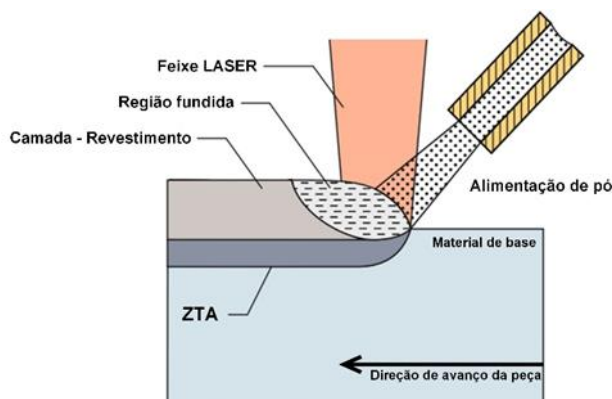


Figura 1. Princípio do processo de *cladding* (Adaptado de Poprawe (2011))

A faixa de tamanho de partícula do material de adição varia de acordo com o sistema utilizado. O pó é alimentado na área de trabalho ao ser acelerado por um gás de transporte, que também serve como gás de proteção para a região aquecida. O sistema utilizado se denomina cabeçote e disponibiliza material de deposição na região a ser incidida pela radiação laser. Cada cabeçote possui um sistema de alimentação de pó que causa uma distribuição de partículas característica. No mercado, encontram-se vários modelos de cabeçotes de laser cladding, sendo eles diferenciados pela forma que proveem o pó e sua relação geométrica com o feixe de laser. A Figura (2) apresenta três concepções distintas de cabeçote e a forma do fluxo de pó respectiva de cada um.

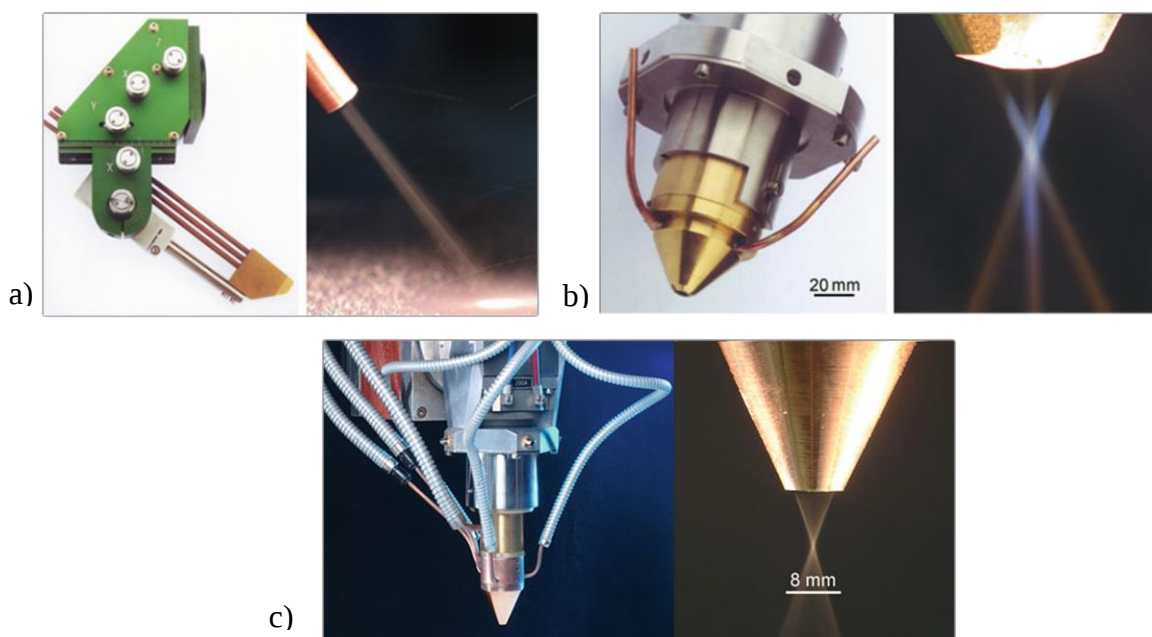


Figura 2. Imagens dos diferentes tipos de bocais de *cladding* e seus respectivos feixes de pó (Adaptado de Poprawe (2011))

O cabeçote com alimentação lateral de pó (a) aplica o pó obliquamente ao eixo do laser, em um ângulo e distância pré-estabelecidos. Este sistema não é adequado para trabalhar em processos com sentido e direção de movimentação significativamente variáveis. Nos cabeçotes coaxiais, sejam eles coaxiais descontínuos (b) ou coaxial contínuos (c), o pó é expelido de forma coaxial e convergente ao feixe laser, de modo que é um feixe cônico de pó para a região focal. Ambos bocais podem trabalhar com laser *cladding* em três dimensões, contudo cabeçotes descontínuos podem ser operados horizontalmente ao contrário do cabeçote contínuos. Em contra partida, cabeçotes contínuos permite maior resolução de cordão depositado (Khajepour *et al.*, 2004; Poprawe, 2011). A maioria dos cabeçotes de laser cladding permite ajustar a posição do foco do pó e do laser, visando a otimização da deposição. Em geral, ambos pontos focais são posicionados coincidentemente sobre a superfície de trabalho (Ya *et al.*, 2015 e Melo, 2015). A Tabela (1) apresenta os principais parâmetros dos processos de laser cladding a pó e suas faixas de valores usuais.

Tabela 1. Parâmetros importantes no processo de *cladding* (Adaptado de Poprawe (2011))

Parâmetro	Valores típicos	Unidades
Potência laser	200 – 4000	W
Diâmetro do feixe LASER	0.6 – 8	mm
Velocidade	200 - 2000	mm/min
Taxa de alimentação do pó	0,5 - 30	g/min
Tipo de gás	He e Ar	-
Vazão do gás	2 – 15	L/min

Entre as aplicações do LASER *cladding*, destaca-se a proteção contra corrosão e desgaste de peças através do revestimento das mesmas, a recuperação do volume de eixos que sofreram desgaste e a readequação geométrica de moldes de injeção. A geometria final dessas peças pode ser obtida, posteriormente, por processos de usinagem (Khajepour *et al.*, 2004 e Poprawe, 2011). Neste trabalho, como o título sugere, o revestimento de um aço estrutural comum, SAE 1020, pelo aço inoxidável AISI 316L será estudado; aspectos referentes a composição química, a dureza e a diluição da deposição efetuada serão descritos.

2. EXPERIMENTAL

O sistema utilizado na experimentação consiste em um cabeçote de *cladding* contínuo anular. A nomenclatura anular se deve a forma da fresta por onde o pó, metálico no caso, é expelido. O tamanho máximo de partícula permitido pelo sistema é de 90 μm de modo que todo o pó utilizado foi filtrado para satisfazer essa condição. Uma fotografia do cabeçote se encontra na Fig. (3). Este cabeçote permite um ajuste coaxial de aproximadamente 45mm entre o ponto focal do pó e o ponto focal do feixe de laser. Esta variável foi estudada durante a experimentação.



Figura 3. Cabeçote coaxial contínuo anular utilizado

O sistema de alimentação de pó para o cabeçote consiste em um alimentador de pó a disco. Uma vez que se trata de um sistema comum, encontrado em outros processos que necessitam da alimentação de um fluxo de pó constante, maior descrição não é necessária. Como fonte laser foi selecionada uma fonte laser de fibra IPG – YLS 10000, com potência de saída máxima nominal de 10 kW. A óptica utilizada permite concentrar essa energia em um ponto focal de aproximadamente 880 μm de diâmetro. O ponto focal do feixe de pó possui um pouco mais de um milímetro de diâmetro.

A óptica e o cabeçote de laser *cladding* estão acoplados em um sistema cartesiano de coordenadas, onde o cabeçote se movimenta verticalmente no eixo Z e o corpo de prova se movimenta no plano XY. Esta configuração permite maior estabilidade do fluxo de pó, uma vez que o cabeçote não sofre os deslocamentos bruscos relacionados com a velocidade de processamento.

2.1. Caracterização do Pó AISI 316L

O pó metálico adquirido possuía granulometria padrão entre (45 e 154) μm e foi fabricado pelo processo de atomização, como informado pelo fabricante. Contudo, para acumular conhecimento do processo, foi feita a caracterização do pó, que incluiu a análise de geometria prévia ao peneiramento para faixa permitida pelo cabeçote e distribuição de tamanho de partícula após peneiramento. A Fig. (4) ilustra imagens micrográficas do pó feitas em várias ampliações em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

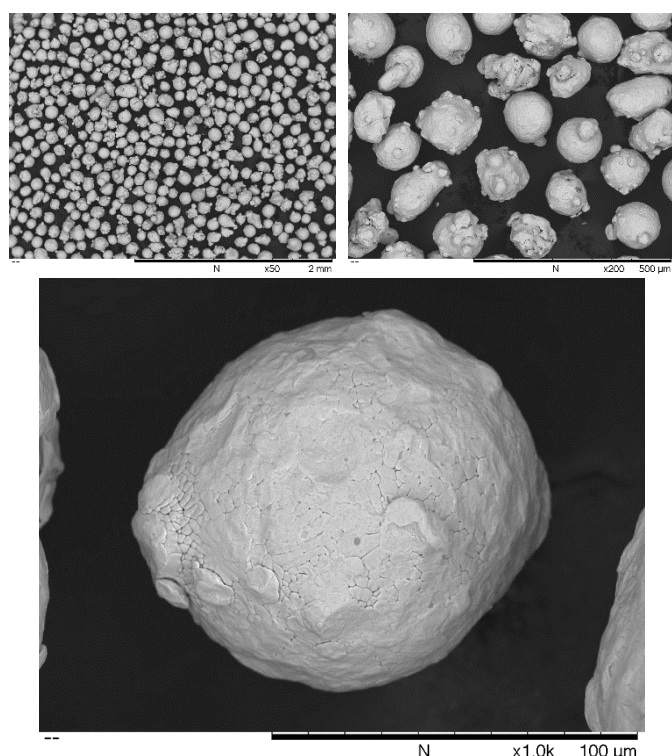


Figura 4. Análise de forma e dimensional do pó de AISI 316 L, prévia ao peneiramento para faixa permitida.

Conforme pode-se observar nas imagens o pó possui um formato quase-esférico, quando não esférico, e apresenta geometria arredondada. Esta geometria é possível graças a seu processo de obtenção, a atomização a gás. Esse formato é adequado para o processo de laser cladding, pois uma vez arredondado, o pó exercerá um efeito de abrasão menor no bocal do cabeçote, que é fabricado em bronze. O bocal é fabricado em bronze para que possíveis reflexões do feixe de laser não danifiquem o equipamento.

Contudo, devido à necessidade de peneiramento, fez-se necessária uma nova análise de tamanho de grão, uma vez que não se podia utilizar a distribuição de tamanho de grão anterior, a qual poderia causar problemas de entupimento. Assim, utilizando um equipamento de medição granulométrica, foi obtido um histograma, que permitiu avaliar a distribuição das faixas de tamanho de grão de uma amostra de pó peneirado. A Figura (5) apresenta este gráfico. Com esta análise, verificou-se que o tamanho médio do pó após a filtragem ficou com 92,4 µm, ou seja, o peneiramento manual não foi suficiente para colocar a granulometria média abaixo de 90 µm. No entanto, mesmo nesta condição, o fluxo de pó foi testado e não foram encontrados problemas de entupimento junto ao cabeçote de laser cladding, determinando que o pó estava pronto para uso.

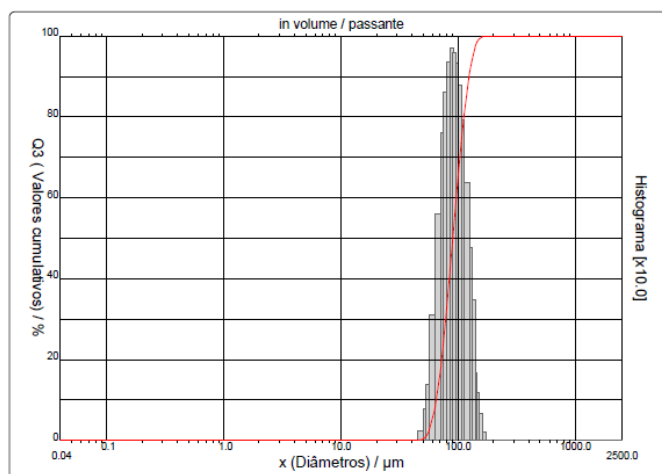


Figura 5. Distribuição granulométrica após peneiramento <90 µm.

2.2. Testes de Cordão e Sobreposição

O principal objetivo dessa primeira fase de experimentação do processo de laser *cladding* foi determinar uma faixa de parâmetros de cordão adequados ao processamento. As características de cordão requeridas para a aplicação da metalização ideal englobam baixa diluição, ausência de poros, e largura e altura do cordão adequadas para sobreposição dos mesmos. Todos os testes foram realizados utilizando como substrato chapas de 10 mm de espessura de SAE 1020, com deposição de pó de AISI 316L na faixa de granulométrica de (50,0 - 110) μm .

Cordões de 20 mm de comprimento foram depositados separadamente e tiveram seu perfil (seção transversal) caracterizado e mensurado metalograficamente. O processo entra em regime constante após aproximadamente três milímetros. Todos os testes foram realizados com um fluxo de alimentação de pó de 22,4 g/min, fluxo de gás de arraste de 5 L/min e fluxo de gás de proteção de 20 L/min. Para ambos os fluxos gasosos foi utilizado argônio. Os parâmetros variados na fase de parametrização de cordão foram a potência de saída do laser, a velocidade de avanço e a distância entre o foco de pó e o foco do laser (z). Em todas as situações, o foco do feixe de pó permaneceu coincidente com a superfície do substrato. Duas potências de laser foram testadas, 1,5 kW e 2 kW. Cada uma delas foi combinada em diferentes cordões com as velocidades de (500 a 4000) mm/min, com acréscimos de 500 mm/min de passo a cada cordão. Concluindo a combinação de parâmetros, todos os pares de velocidade e potência foram combinados com três alturas de z diferentes, 15 mm, 20 mm e 25 mm.

A largura do cordão na superfície da amostra, profundidade de poça fundida e altura de cordão a partir da superfície foram mensuradas para cada parâmetro e relacionadas com os parâmetros de processamento utilizados. Esta relações foram estabelecidas para se analisar a influência de cada parâmetro na formação de um cordão.

Após os testes de cordão executados, três cordões foram selecionados e aplicados nos testes de sobreposição de cordões. Os valores percentuais para o espaçamento entre as deposições em linha foram definidos como 50 %, 40 %, 30 % e 20 % de sobreposição, ou seja, o valor real do espaçamento era calculado baseado na largura do cordão de cladding em questão. Por exemplo, para uma sobreposição de 30 %, o valor de 70 % da largura do cordão selecionado era tido como o valor do espaçamento para aqueles testes. Os testes foram realizados dessa maneira para permitir a comparação entre os resultados obtidos.

2.3. Análise de Microdureza

O perfil de dureza do melhor revestimento foi medido utilizando um microdurômetro Vickers. O padrão de aquisição utilizado para medição é apresentado no esquema mostrado na Fig. (6). Para melhor tratamento dos dados, foram feitos três perfis de dureza lateralmente (M1, M2 e M3), visando obter um valor médio.

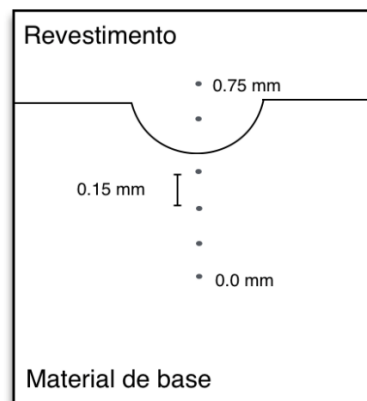


Figura 6. Esquema de medição do perfil de dureza da amostra de sobreposição.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura (7), apresenta alguns dos resultados obtidos nas análises metalográficas, onde cada um dos quadros apresenta a variação de parâmetros para uma das três condições focais ensaiadas. Logo abaixo dessa figura se encontra o gráfico que descreve, para todos os testes realizados, o efeito da velocidade na largura do cordão depositado, Fig. (8). Como pode ser observado, o aumento da velocidade causa a redução da largura de cordão, o que é lógico, pois uma vez que a taxa de alimentação de pó foi mantida, menos gramas de material serão depositadas por milímetro, já que o volume de material deve ser distribuído por um percurso maior. Esta mesma teoria e efeito se aplicam a largura do cordão, que reduz com o aumento de velocidade. A profundidade da poça fundida também diminui com o aumento da velocidade, contudo não devido à taxa constante de deposição de material, mas sim devido à potência de laser constante. Com uma

mesma potência do laser e maior velocidade, menor é a quantidade de energia depositada sobre um mesmo comprimento. Assim, menos energia gerou menor profundidade de poça fundida, uma vez que a redução simultânea na quantidade de pó alimentado por comprimento não foi suficiente para exercer o efeito contrário.

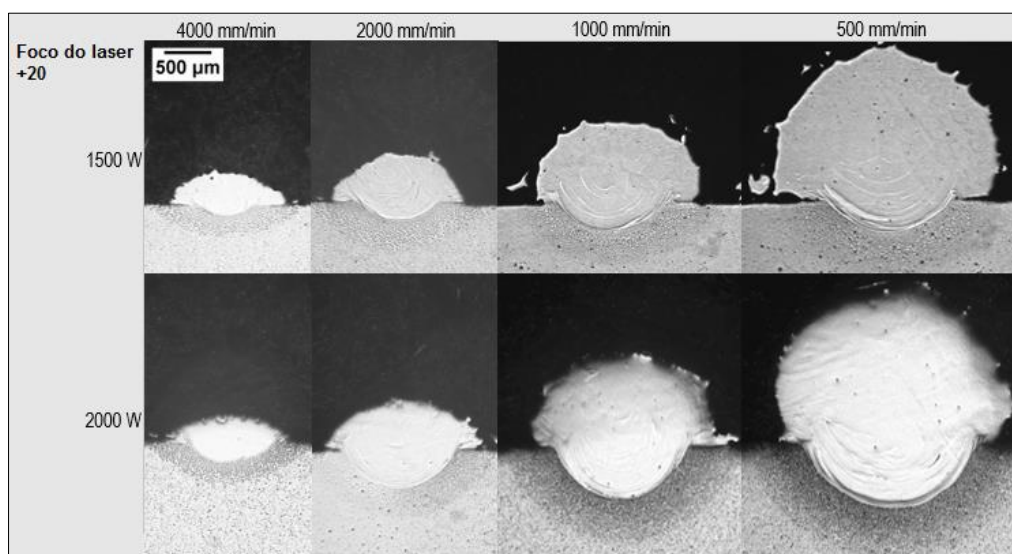


Figura 7. Micrografias da primeira bateria de ensaios

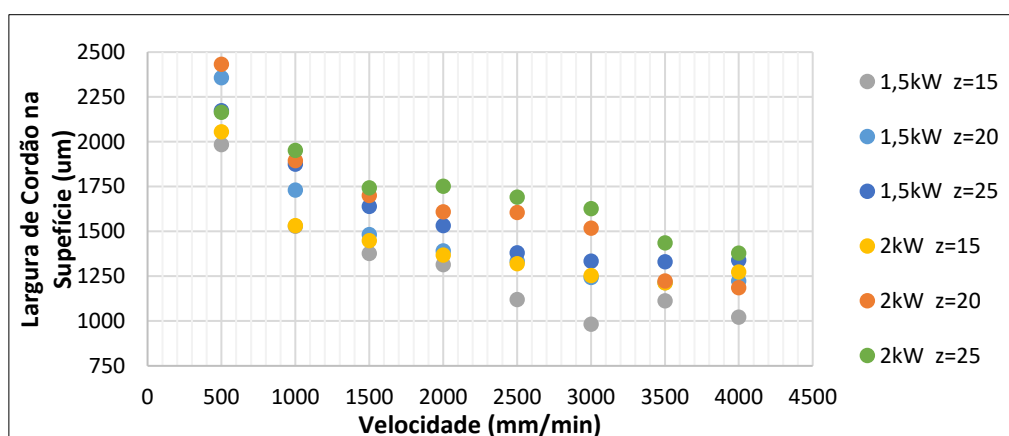


Figura 8. Influência da velocidade de avanço na largura do cordão depositado

Com o aumento da potência, de 1,5 kW para 2 kW, apenas foi possível afirmar que a profundidade da poça fundida aumentou, enquanto a relação da potência com as outras propriedades exige mais dados. A análise dos efeitos da variação da distância do foco do feixe de laser para a superfície também não pôde ser completa. Somente se pode afirmar que nesta faixa estudada, a distância de 20 mm gerou cordões mais altos que as outras configurações.

As micrografias dos três cordões selecionados para os testes de sobreposição se encontra na Fig. (9). Figura 9. Cordões com seções transversais baixas e achatadas foram escolhidos para os ensaios de geração de cordões sobrepostos no intuito de evitar a formação de poros entre cordões.

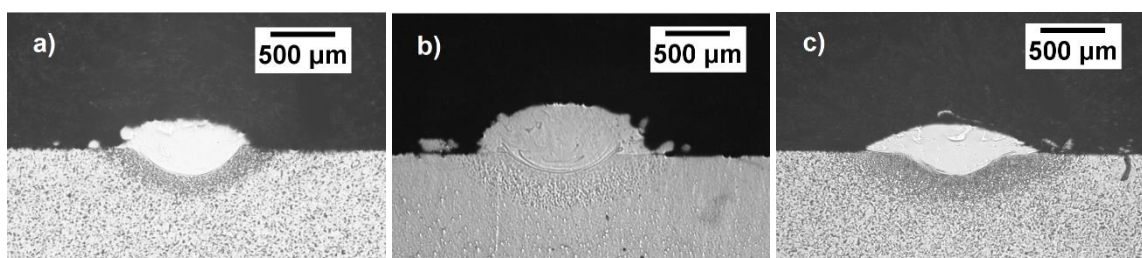


Figura 9. Cordões selecionado para testes de sobreposição

3.1. Sobreposição de Cordões - Revestimento Final

Os testes seguiram a descrição feita na seção experimental. O melhor revestimento foi o realizado com o cordão apresentado anteriormente na Fig. (9. b) e com sobreposição de cordão de 20 %, outros valores de sobreposição apresentaram porosidade entre cordões, superfície excessivamente irregular ou eficiência inferior. No teste em questão, z foi ajustado para 15 mm, a potência de laser permaneceu em 1,5 kW e a velocidade de processamento utilizada foi de 4000 mm/min, de acordo com os parâmetros de cordão originais. A largura do cordão escolhido é de aproximadamente 970 μm , de forma que o espaçamento entre cordões foi calculado em 776 μm . Na Figura (10) a macrografia transversal do melhor revestimento executado é apresentada.



Figura 10. Seção transversal do melhor revestimento executado

A altura de revestimento mensurada está próxima de 466 μm , com taxa de diluição aparente de 17 %. Foram encontrados em outros revestimentos valores menores de diluição, até 8 %, contudo estes revestimentos apresentavam alta porosidade ou inconsistência geométrica. Este revestimento apresentou o melhor resultado por não apresentar os defeitos mencionados enquanto possuía baixa diluição e relativamente alta taxa de deposição. A taxa de deposição estimada é de 0,186 m^2/h e a resistência à corrosão de todas as deposições pode facilmente ser comprovada ao se observar que a camada depositada de AISI 316L não foi atacada pelo reagente metalográfico (nital 2 %), ao contrário do substrato de SAE 1020.

3.2. Resultados de Microdureza

Foi medido o perfil de dureza da amostra apresentada na Fig. (10) de acordo com o esquema apresentado anteriormente na Fig. (6). Figura 6. O gráfico apresentado na Fig. (11) exibe os dados adquiridos.

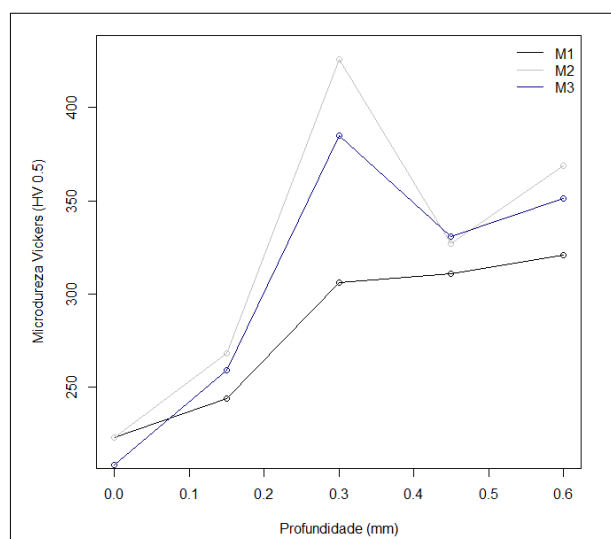


Figura 11. Perfil de microdureza Vickers, revestimento final.

Como pode-se observar no gráfico, há um pico no valor de dureza na profundidade de medição de 0,3 mm. De acordo com o esquema da Fig. (6), a posição 0,3 mm fica logo abaixo da poça fundida, fazendo ainda parte do material de base, mas sendo uma região consideravelmente afetada pelo calor gerado pelo feixe laser. Na análise realizada em microscópio

óptico, foi possível observar que, exatamente nesta região, ocorreu refino de grão e formação martensítica, conferindo ao material elevada dureza localizada. No entanto, para concluir exatamente quais transformações microestruturais ocorreram nesta região, análises mais aprofundadas precisariam ser realizadas. Um tópico interessante para futuros trabalhos.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos são bastantes promissores e demonstraram a capacidade de aplicação deste processo no meio industrial, pois, como foi apresentado, o material de revestimento depositado pelo método de laser *cladding* adicionou características superiores ao substrato de aço comum. A resistência à corrosão foi comprovada e a dureza superior do revestimento foi evidenciada pelo teste de microdureza.

Estes dois ganhos se devem a característica de baixa diluição (aparente de 8 % a 17 %) que este processo resulta. Ao contrário de outros processos, como o de aspersão térmica, o material de base e o material de adição são fundidos, gerando uma região de transição entre os dois materiais. A altura da camada depositada da melhor amostra é de aproximadamente 460 µm, mostrando que uma fina camada basta para providenciar qualidade adicionais ao substrato.

No entanto, é válido mencionar que há maneiras para aumentar a produtividade apresentada, ainda se utilizando do processo de laser *cladding* com pó. A forma mais adequada para o recobrimento de grandes áreas, sem dúvida, seria a aplicação de laser *cladding* em linha, onde podem haver deposições de até 25 mm de largura por cordão. Este processo segue os mesmos princípios, e apenas se utilizada de um cabeçote de *cladding* linear.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP - LASER) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) na realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Kaierle, S., Barroi, A., Noelke, C., Hermsdorf, J., Overmeyer, L. and Haferkamp, H. (2012), “Review on Laser Deposition Welding: From Micro to Macro”, *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 336–345.
- Khajepour, A., Toyserkani, E. and Corbin, S. (2004), *Laser Cladding*, edited by CRC, CRC Press, available at: <https://doi.org/10.1201/9781420039177>.
- Melo, L. (2015), *Powder Jet Particle Density Distribution Analysis and Qualification for the LASER Metal Deposition*, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Paydas, H., Mertens, A., Carrus, R., Lecomte-Beckers, J. and Tchoufang Tchuindjang, J. (2015), “Laser cladding as repair technology for Ti–6Al–4V alloy: Influence of building strategy on microstructure and hardness”, *Materials & Design*, Elsevier Ltd, Vol. 85, pp. 497–510.
- Poprawe, R. (2011), *Tailored Light 2*, edited by Poprawe, R., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01237-2>.
- Schweitzer, L. (2015), “Laser Cladding for Epitaxial Nickel Base Superalloys Turbine Blades”.
- Ya, W., Pathiraj, B. and Liu, S. (2015), “2D modelling of clad geometry and resulting thermal cycles during laser cladding”, *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier B.V., Vol. 230, pp. 217–232.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

POWDER LASER CLADDING OF AISI 316L OVER SAE 1020 SUBSTRATE FOR MACHINERY CORROSION PROTECTION

COBEF2017-0658

Abstract: Shielding metallic surfaces from corrosive environment is a well-known problem on the machinery industry. Protective layers are in many cases the most affordable solution. For such, many processes are available, from which the use of powder laser cladding has recently gaining space within the production lines. Laser cladding a protective layer of AISI 316L over a SAE 1020 flat surface is hereby evaluated and exemplified. A laser cladding head with coaxial powder feeding by an annular aperture was employed together with a 10 kW fiber laser. Process parameters were tested aiming to minimize dilution and use of powder, therefore, maintaining corrosion protection and reducing costs. Layer continuity was considered on the results. The coating's, molten pool's and diffusion zone's Vickers microhardness were measured to evaluate the interface between clad and substrate. Our research consolidates the knowledge of powder laser cladding as a worthy tool for large machinery and pipeline industries.

Key-words: Powder Laser cladding; Corrosion protection; AISI 316L