

PRODUÇÃO DE RECOBRIMENTO POR LASER CLADDING A PARTIR DE LIGA QUASICRISTALINA Al-Co-Fe-Cr

L. G. B. de Oliveira⁽¹⁾, W. Wolf⁽¹⁾, C. R. M. Afonso⁽¹⁾, W. J. Botta⁽¹⁾, C. S. Kiminami⁽¹⁾.

(1) Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos. Rodovia Washington Luiz, Km 235, CEP:13565-905, São Carlos/SP.

*e-mail: laugbo@gmail.com

Os recobrimentos a partir do pó da liga quasicristalina $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ (%at) foram produzidos através de tratamento superficial a laser (cladeamento) e caracterizados microestruturalmente. Os lingotes foram processados por solidificação rápida através de conformação por spray, com posterior realização de Laser Cladding em substrato alumínio comercialmente puro. Tal processo foi realizado com laser de fibra de itérbio, variando-se parâmetros do laser em cada trilha fabricada, obtendo-se condições diversas pela combinação de parâmetros. A caracterização foi realizada por técnicas de microscopia e difração de raio-X, e ensaios mecânicos de microdureza Vickers, analisando-se a interface entre o recobrimento e o substrato. O recobrimento da liga $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ por laser cladding apresentou uma microestrutura refinada, contendo as fases $\mu-Al_5Co_2$ e $M-Al_{13}Co_4$. Nos ensaios de microdureza, os recobrimentos apresentam valores de microdureza entre 310 e 719 HV, valores expressivos para uma liga a base de Al, que abre perspectivas para aplicações que requerem alta resistência ao desgaste.

Palavras-chave: Ligas quasicristalinas, ligas de Alumínio, Laser Cladding, Caracterização Microestrutural

INTRODUÇÃO

Ligas metálicas nanocristalinas e quasicristalinas a base de Alumínio possuem excelentes propriedades químicas e físicas como resistência

mecânica e a corrosão, superiores aos seus respectivos cristalinos (1). Através de altas taxas de resfriamento das ligas desde o estado líquido é possível interromper o processo de nucleação dos átomos, que dessa forma se posicionam de maneira desordenada, obtendo ligas metálicas amorfas.

Com isso em mente, dentre as rotas de processamento de materiais mais modernas, o uso de laser tem apresentado grande destaque por suas vantagens como aumento da produtividade, redução de custos operacionais, melhoria na qualidade e acabamento dos produtos, aumento na flexibilidade nas linhas de produção e projeto e ampliação do leque de possibilidades de aplicações (2).

Apesar de seu desenvolvimento ser recente, essa técnica já é utilizada em aplicações envolvendo os mais diversos tipos de materiais. Lasers de alta potência como o CO₂ (meio ativo gasoso) e Nd-YAG (estado sólido), ambos emitindo na faixa de radiação infravermelha, são utilizados em etapas de processamento como a soldagem, corte, furação, gravação e tratamentos térmicos (3) (4) (5). O investimento inicial para implantar esse tipo de técnica é alto, mas é justificado pelo amplo campo de atuação em que esta pode estar inserida (3).

Pensando na possibilidade de obter ligas metálicas nano ou quasicristalinas através do processamento descrito acima, neste trabalho foi realizada a produção de recobrimentos a partir de pós de ligas quasicristalinas de Al-Co-Fe-Cr através de tratamento superficial a laser (cladeamento) e a posterior caracterização microestrutural destes mesmos recobrimentos. A liga escolhida para este estudo é a de composição Al₇₁Co₁₃Fe₈Cr₈ (%at). Os lingotes foram obtidos através de forno a arco eletrolítico e processados através de solidificação rápida através de conformação por spray e através de moagem de alta energia. A partir da caracterização microestrutural destes pós e depósitos foram selecionadas faixas granulométricas específicas que serviram de base (pó) para a realização de experimentos de Laser Cladding em um substrato de alumínio comercialmente puro. Foi feita uma seleção de parâmetros otimizados do laser como a potência (200, 300 e 400 W) e velocidade de varredura (50, 100 e 150 mm/s). Os recobrimentos foram caracterizados através das técnicas de difração de raios-X (DRX), microscopia

eletrônica de varredura (MEV), microscopia eletrônica de transmissão (MET) e microdureza Vickers. Foi observado, além da microestrutura, a interface e a diluição entre o recobrimento gerado e o substrato de alumínio.

MATERIAIS E MÉTODOS

O lingote da liga de composição $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ (%at) foi fundida em forno a arco eletrovoltaico e a partir desse lingote foi obtido o pó da liga, através do processo de atomização e de moagem de alta energia, gerando um depósito de espessura de milímetros e pós de faixas granulométricas de $< 20 \mu m$, 20 a $50 \mu m$, 50 a $105 \mu m$, 105 a $180 \mu m$, 180 a $425 \mu m$, e $> 425 \mu m$. A faixa de granulometria do pó escolhida para ser base (pó) do processo de laser cladding foi de $\Phi < 20 \mu m$ e $106 \mu m < \Phi < 180 \mu m$.

A primeira etapa do tratamento superficial a laser consistiu em dispersar o pó micrométrico na superfície na chapa de alumínio puro série 1000 com dimensões 100 mm comprimento x 100 mm largura x 20 mm espessura e com um rebaixo de $200 \mu m$, a qual serviu de substrato para a obtenção do recobrimento com o pó através de laser cladding. O pó moído foi depositado sobre substrato de Al recobrimo metade da superfície total. A outra metade foi preenchida com o pó atomizado. Posteriormente, a superfície do sistema pó e substrato foi varrida com Laser de Fibra de Yb (itérbio) de Alta Energia, fazendo trilhas sobrepostas. O resultado desse processo pode ser visto na imagem abaixo (Fig. 1).



Figura 1 - Recobrimentos da liga $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ após serem tratados por laser cladding em substrato de alumínio: a) trilhas sobrepostas do pó atomizado e b) trilhas sobrepostas do pó moído.

Os parâmetros utilizados entre as diferentes trilhas foram variados e estão descritos nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no tratamento superficial através de Laser Cladding com Laser de Fibra de Yb (itérbio) de Alta Energia com pó atomizado. Trilhas sobrepostas referentes ao conjunto de trilhas da Fig. 1a acima (ordem de baixo para cima). Rebaixo do substrato: 200 µm.

Trilhas sobrepostas	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Dist. Focal (mm)	Espaço entre trilhas (mm)
TSS10150	1000	150	8	0,5
TSS4150	400	150	8	0,5
TSS6150	600	150	8	0,5
TSS4100	400	100	8	0,5
TSS10100	1000	100	8	0,5
TSS466	400	66,7	8	0,5
TSS1266	1200	66,7	8	0,5

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no tratamento superficial através de Laser Cladding com Laser de Fibra de Yb (itérbio) de Alta Energia com pó moído. Trilhas sobrepostas referentes à amostra da Fig. 1b acima (ordem de baixo para cima). Rebaixo do substrato: 200 µm.

Trilhas sobrepostas	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Dist. Focal (mm)	Espaço entre trilhas (mm)
TSM8150	800	150	8	0,5
TSM4150	400	150	8	0,5
TSM4100	400	100	8	0,5
TSM6150	600	150	8	0,5
TSM2100	200	100	8	0,5
TSM466	400	66,7	8	0,5

Após a etapa de cladeamento, as chapas foram cortadas em cortadeira de precisão, seguindo um corte transversal separando as trilhas feitas com o pó atomizado e com o pó moído, e possibilitando a obtenção de amostras da seção transversal das trilhas. As análises de difração de raios-X foram realizadas na superfície das trilhas, obtendo as fases presentes no recobrimento, utilizando uma radiação Cu-K α , para definir as fases presentes nos recobrimentos. A análise por microscopia eletrônica de varredura foi realizada na seção transversal das trilhas, em um equipamento Field Emission

Gun (FEG), tendo como objetivo verificar a microestrutura resultante depois do laser cladding como também a interface entre o substrato e a trilha, observando-se fenômenos de diluição, porosidade, entre outros.

Para o ensaio de microdureza Vickers foi selecionada a amostra TSM4150, pois tinha uma área transversal suficientemente grandes para a realização da medida de microdureza. A carga utilizada para o ensaio foi de 0,05HV, totalizando uma carga aplicada de 50 gramas. Os pontos experimentais foram feitos na seção transversal da trilha, de maneira a se obter um perfil de durezas a partir do topo das trilhas até o substrato de aço, verificando-se as mudanças causadas nos valores de dureza em função da diluição da liga Al-Co-Fe-Cr no substrato.

Após essas análises, uma amostra (TSS6150) foi selecionada para ser preparada para MET, através de FIB. A microscopia eletrônica de transmissão foi realizada na Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingenieria Mecanica Y Materiales, em Valência na Espanha, pelo Professor Conrado Ramos Moreira Afonso.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Difração de Raio-X

Independente do processo de obtenção do pó, as fases presentes após o cladeamento a laser foram Al-fcc, $Al_{13}Co_4$ e Al_5Co_2 , como visto na Fig. 2.

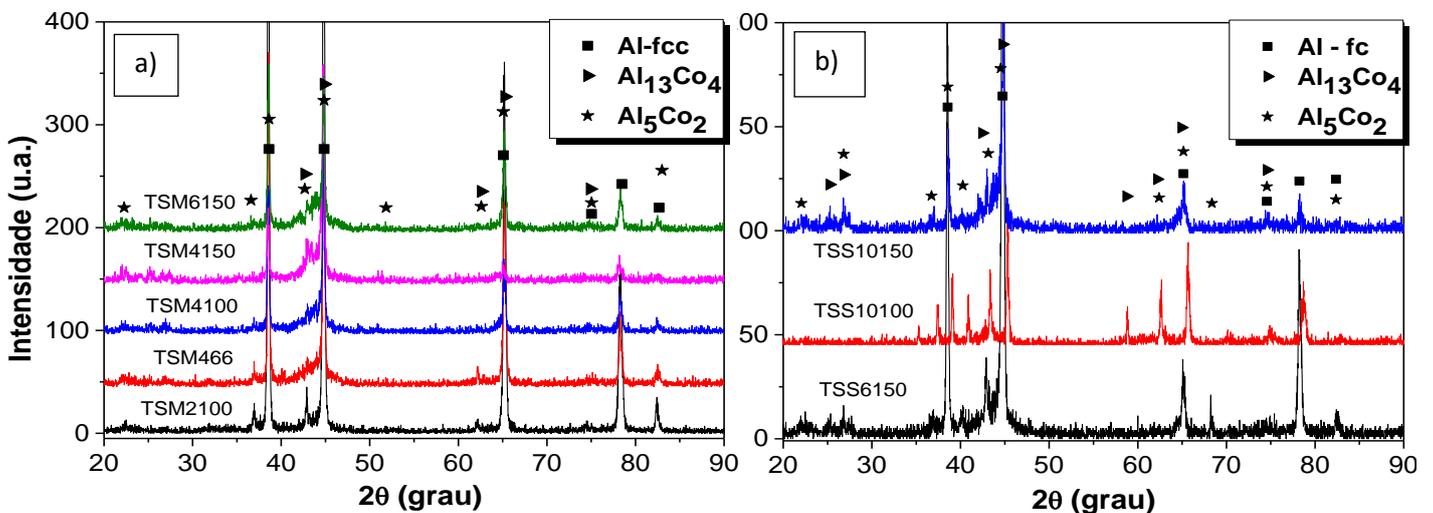


Figura 2 - Difratogramas de raios-X para os recobrimentos fabricados a partir do a) pó moído e b) pó atomizado.

As fases $Al_{13}Co_4$ e Al_5Co_2 já estavam presentes nos pós antes do processo de cladeamento. A fase Al-fcc é provavelmente provinda do substrato. Sendo assim, não houve mudanças das fases cristalinas do pó para o recobrimento, após o processamento a laser. Comparando os difratogramas dos recobrimentos fabricados pelo pó moído e pelo pó atomizado, a diferença mais notável entre eles é a presença de uma região de pico alargado ($2\theta = 40^\circ$ à 50°) nas curvas do pó atomizado, o que pode indicar a presença de um volume de fração amorfa na microestrutura. Tal fato poderá ser confirmado com as análises de MEV posteriormente.

Microscopia Eletrônica de Varredura

Recobrimento TSM466

A amostra foi fabricada a partir do pó moído com sobreposição de trilhas igual a 0,5 mm, utilizando como parâmetros de processamento potência = 400W, velocidade = 66,7mm/s e distância focal = 8mm, mostrada na Fig. 3.

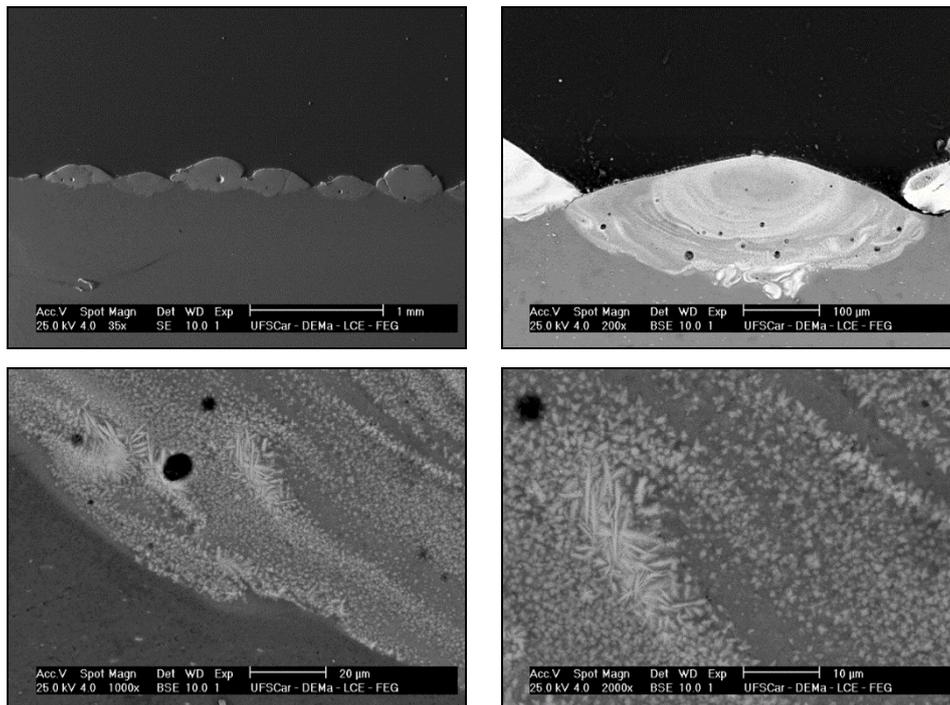


Figura 3 – Imagens de MEV referentes ao recobrimento com sobreposição de trilhas a partir do pó moído $P = 400\text{ W}$, $V = 66,7\text{ mm/s}$ e $DF = 8\text{ mm}$.

Pelas imagens pode-se observar uma estrutura dendrítica refinada, mostrando fases cristalinas (dendritas e fase clara nanométrica dispersas na matriz remanescente). Porém, apresentam grande quantidade de defeitos,

principalmente porosidade. É possível observar a presença de uma ligação metalúrgica entre o recobrimento e o substrato, devido a uma notável profundidade de penetração entre esses. Quando comparadas as trilhas individualmente, essas não se apresentam regulares, pois possuem formas e características como altura, largura e profundidade, diferentes entre si.

Recobrimento TSM4150

A amostra foi fabricada a partir do pó moído com sobreposição de trilhas igual a 0,5 mm, utilizando como parâmetros de processamento potência = 400W, velocidade = 150 mm/s e distância focal = 8mm, mostrada na Fig. 4.

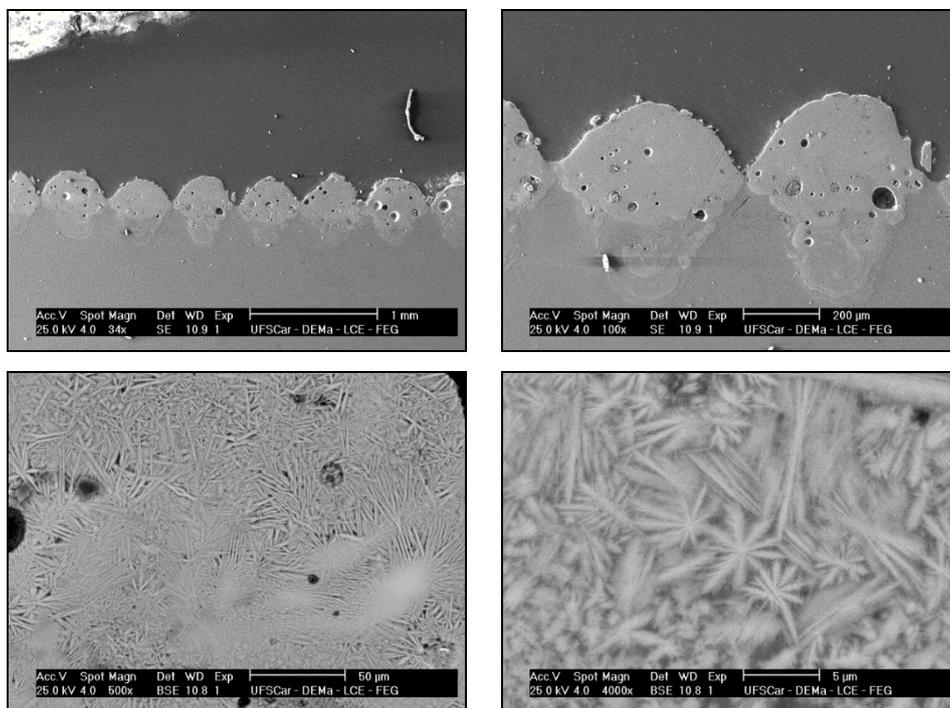


Figura 4 – Imagens de MEV referentes ao recobrimento com sobreposição de trilhas a partir do pó moído $P = 400 \text{ W}$, $V = 150 \text{ mm/s}$ e $DF = 8 \text{ mm}$.

Em relação primeiro recobrimento mostrados com mesma potência e velocidade menor, observa-se neste caso a formação de dentritas maiores, além disso, a diluição foi mais notável. No aspecto geral como recobrimento, o perfil mostrou-se mais homogêneo, uma vez que é possível observar uma continuidade entre uma trilha e outra. Outra característica é a presença de poros, devido ao aprisionamento de gases durante o processo, e presença de trincas. Pode-se inferir que a refusão dos pós não teve tempo suficiente para ser efetiva, para ser obter uma camada contínua, uma vez que a velocidade foi

aumentada em relação ao primeiro recobrimento para este. É possível verificar uma mudança na coloração das fases à medida que se caminha do substrato até a trilha, e além disso, observa-se também a formação de poros macroscópicos tanto no interior das trilhas quanto na interface entre trilha e substrato.

Recobrimento TSS6150

A amostra foi fabricada a partir do pó atomizado com sobreposição de trilhas igual a 0,5 mm, utilizando como parâmetros de processamento potência = 600W, velocidade = 150 mm/s e distância focal = 8mm, mostrada na Fig. 5.

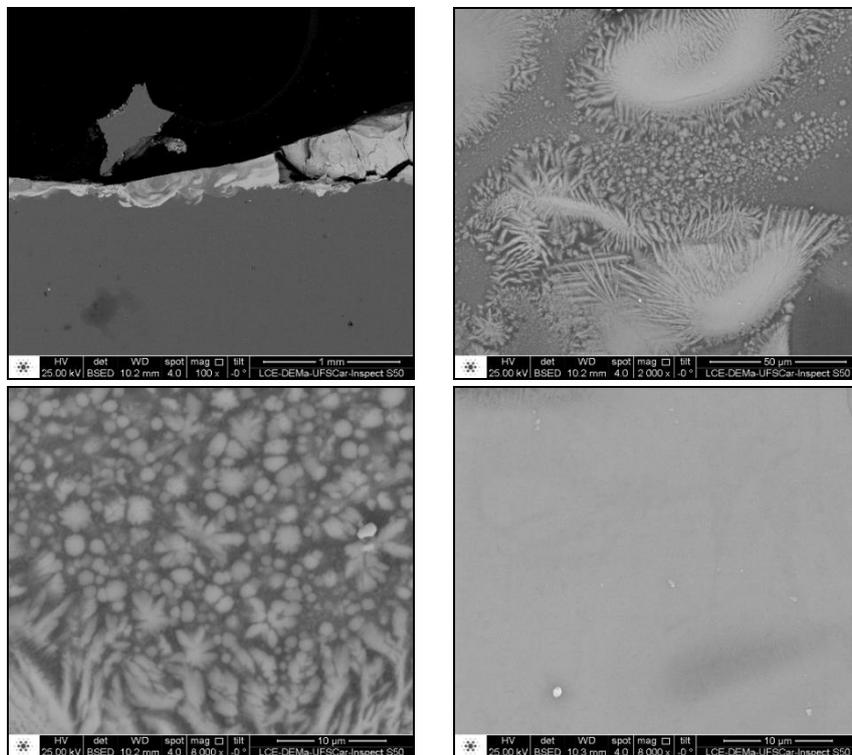


Figura 5 – Imagens de MEV referentes ao recobrimento com sobreposição de trilhas a partir do pó atomizado P = 600 W, V = 150 mm/s e DF = 8 mm.

A partir das imagens obtidas por MEV, observa-se que tal recobrimento apresenta estrutura cristalina dendrítica refinada, apresentando também uma região com microestrutura homogênea (representada pela região de tonalidade mais clara nas imagens), a qual indica que há um volume de fração amorfa, uma vez que com a magnitude de 8000x não foi possível identificar cristais. Tal resultado está de acordo com a análise de difração de raios-X, no qual se observa uma região de pico alargado ($2\theta = 40^\circ$ à 50°). Diferentemente dos

recobrimentos obtidos pelo pó moído, este recobrimento fabricado com pó atomizado não apresenta poros, porém possui uma grande quantidade de trincas.

Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)

Pode-se observar na Figura 6.a e nas imagens de TEM em campo claro (BF) e os respectivos padrões de difração (SAD) nas Fig. 6b e 6c para as regiões R5 e R6 na Fig. 6a. Tais padrões são das fases Al_5Co_2 e $Al_{13}Co_4$, respectivamente. Além disso, a área destacada em vermelho apresenta uma morfologia diferente das encontradas para essas duas últimas fases, podendo indicar a presença de um quasicristal. Para verificação, a Fig. 6.d mostra esta fase e a difração de elétrons (SAD) nessa região, a qual é mostrada a seguir na Fig. 6.e.

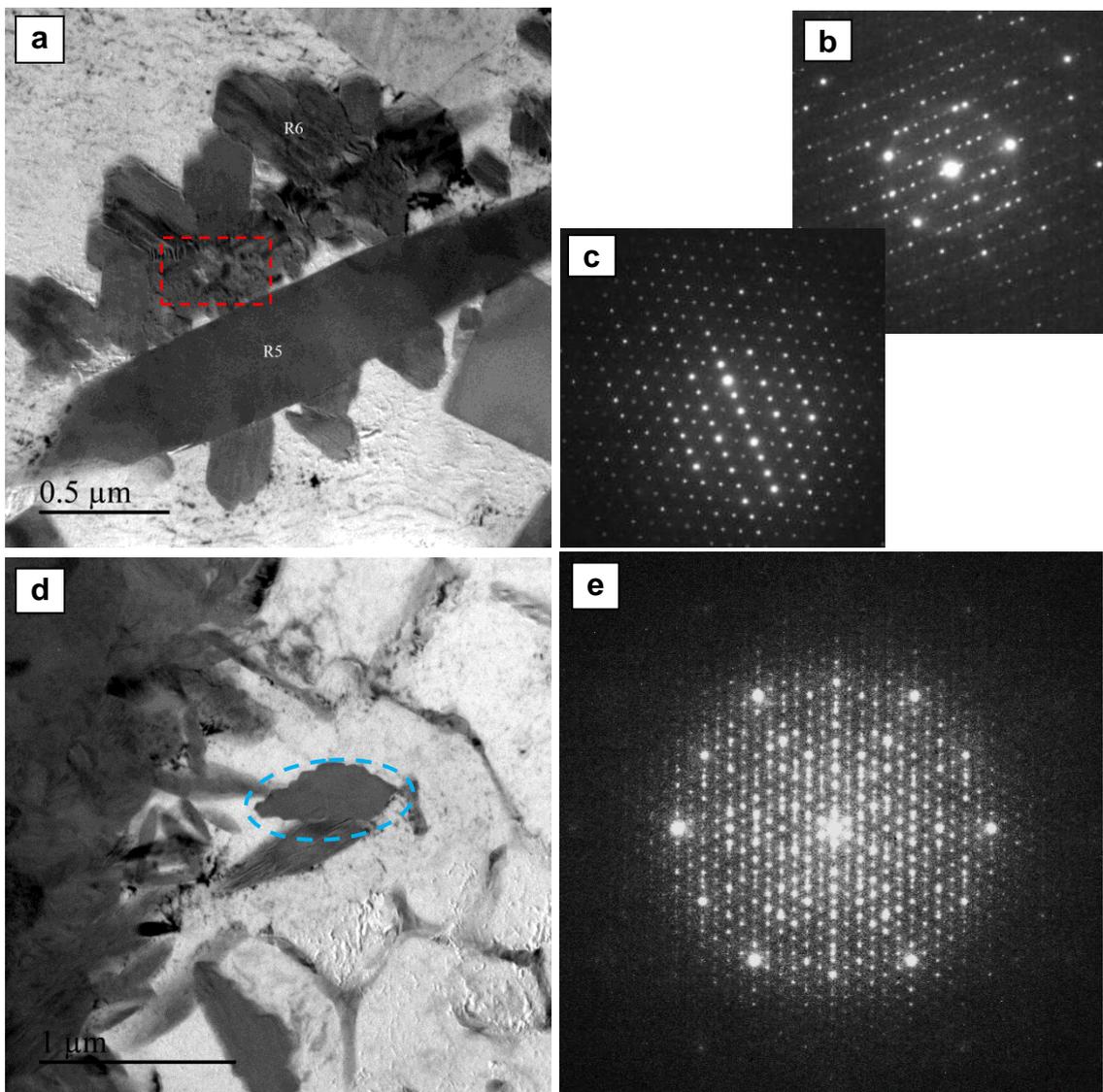


Figura 6 – Imagens de MET referentes ao recobrimento com sobreposição de trilhas a partir do pó atomizado $P = 600\text{ W}$, $V = 150\text{ mm/s}$ e $DF = 8\text{ mm}$.

A Fig. 7 abaixo mostra uma micrografia de STEM (Fig.7a) em campo claro (BF) em baixa magnificação e o respectivo mapeamento de raios-X através de EDS (Spectral Imaging – SI, 256x256 pixels) dos elementos de liga Cr-K (Fig. 7b), Co-K (Fig. 7c) e Fe-K (Fig. 7d) e a localização dos mesmos nas fases.

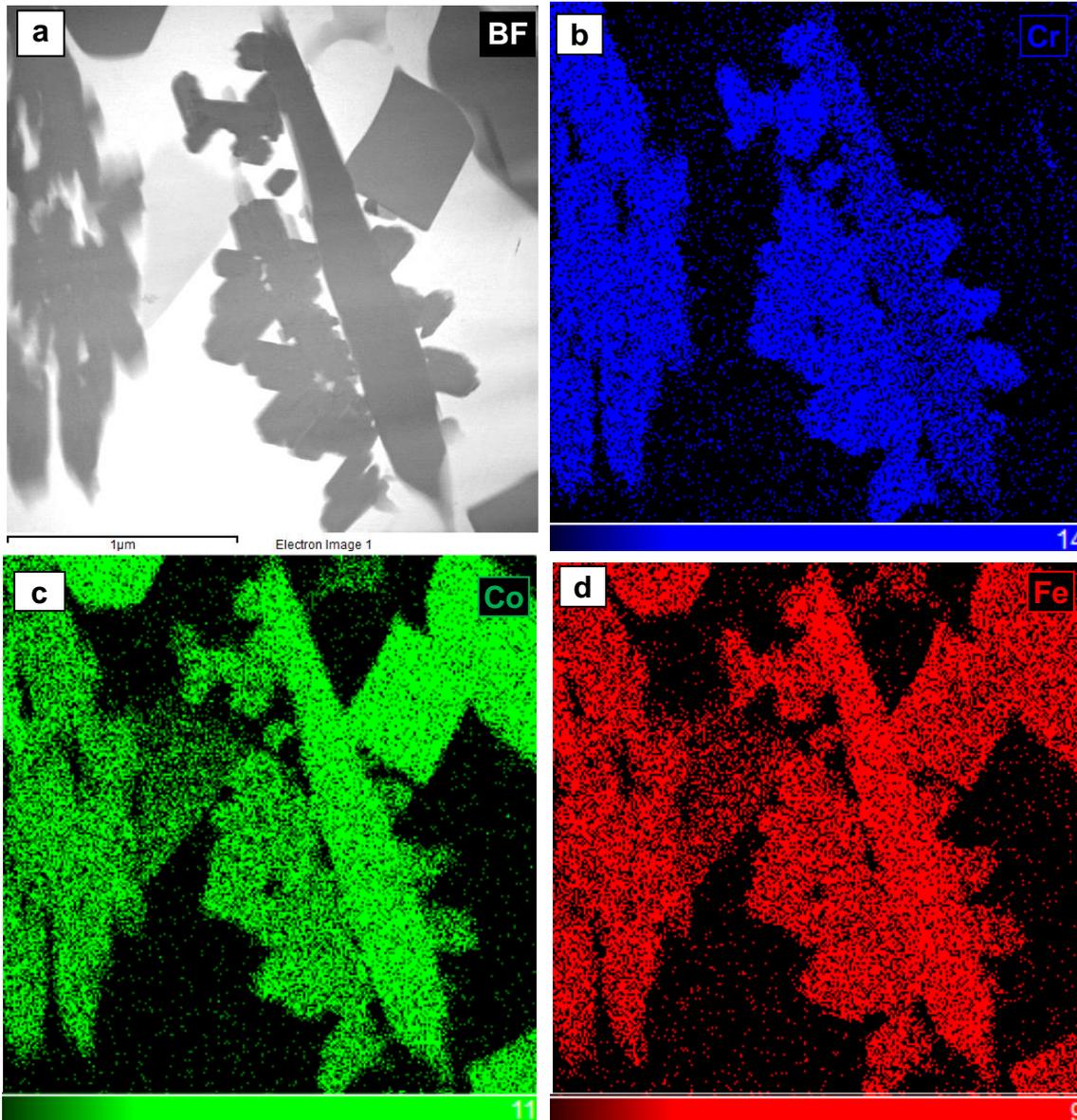


Figura 7 – Imagem de (a) STEM campo claro (BF) em baixa magnificação e mapeamento de raios-X (Spectral Imaging – SI, 256x256 pixels) através de EDS dos elementos (b) Cr-K, (c) Co-K e (d) Fe-K.

Microdureza Vickers

Para os valores apresentados de microdureza Vickers, foram feitos dois perfis de indentações na seção transversal dos recobrimentos, a partir da superfície do recobrimento até o substrato. Os resultados são apresentados em um gráfico dureza Vickers *versus* distância da superfície da trilha, na Fig 8.

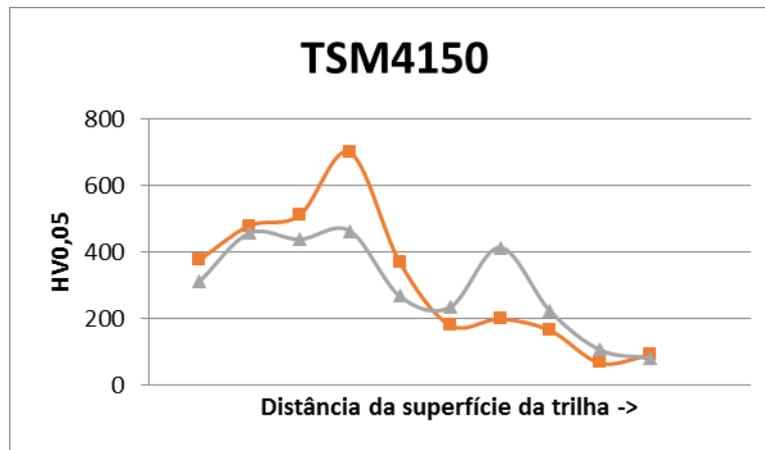


Figura 8 – Pontos experimentais do ensaio de microdureza Vickers para o recobrimento fabricado a partir do pó moído com sobreposição de trilhas igual a 0,5 mm, utilizando como parâmetros de processamento potência = 400W, velocidade = 150 mm/s e distância focal = 8mm

Analisando os resultados, observa-se uma tendência de queda dos valores de microdureza Vickers à medida que vai se afastando da superfície do recobrimento e chegando ao substrato, neste momento os valores de microdureza ficam abaixo de 100 HV_{0,05}. Isto era o esperado, uma vez que os valores encontrados na literatura para a liga de Al são maiores que para o alumínio comercialmente puro. Observando a curva de microdureza, os valores médios de dureza se encontram principalmente na interface entre o recobrimento e o substrato, o que pode ser facilmente verificado na Fig. 8. Isto acontece, pois, essa área provavelmente corresponde à região de interação entre substrato e trilha e, portanto, há uma média de microdureza dos dois materiais. Pelas imagens de MEV (Fig. 5) também pode ser notado a alta diluição entre recobrimento e substrato que teve nessa amostra.

CONCLUSÕES

A liga Al₇₁Co₁₃Fe₈Cr₈ (%at) após o procedimento de tratamento superficial por laser cladding apresentou uma microestrutura refinada, contendo as fases μ -Al₅Co₂ e M-Al₁₃Co₄, as mesmas presentes no pó da liga, além da

fase Al-fcc provinda no substrato de alumínio comercialmente puro, como foi verificado pelos difratogramas de raios-X e pelas imagens de MEV. Alguns recobrimentos ainda apresentaram regiões no qual não foram possíveis diferenciar fase, indicando um volume de fração amorfa, principalmente os que foram fabricadas com o maior valor de potência do laser, como o recobrimento TSS6150 ($P = 600 \text{ W}$), e os recobrimentos fabricados com o pó atomizado. Além disso, foram observados defeitos na microestrutura dos recobrimentos, como a presença de trincas e grande quantidade de poros, principalmente nos recobrimentos fabricados com o pó moído. Nos ensaios de microdureza Vickers, os recobrimentos analisados apresentam valores de microdureza entre 310 e 719 $\text{HV}_{0,05}$, sendo que os maiores valores obtidos para cada recobrimento foram 682 $\text{HV}_{0,05}$ para o TSM4100, 699 $\text{HV}_{0,05}$ para o TSM4150 e 719 para o TSM6150. Outra observação é que valores médios de dureza se encontram principalmente na interface entre as trilhas e o substrato, área que provavelmente corresponde à região de interação entre substrato e trilha e, portanto há uma média de microdureza dos dois materiais.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo suporte ao projeto TEMÁTICO -processo No 2013/05987-8.

REFERÊNCIAS

- (1) F. Audebert, F. Prima, M. Galano, M. Tomut, P. J. Warren, I. C. Stone, B. Cantor. Structural Characterisation and Mechanical Properties of Nanocomposite Al-based Alloys. *Materials Transactions* 43, 2002. 2017 - 2025.
- (2) MAIER, C. et al. Calculation of the temperature profile for laser treatment of metallic samples. *Materials Science and Engineering A*, v. 150, pp.271-280, pp. 1992.
- (3) READY, J. F. *Industrial applications of lasers*. New York: Academic Press, 1978.
- (4) MAILLET, H. *O laser: Princípios e Técnicas de Aplicação*. São Paulo: Editora Manole, 1987.
- (5) DA COSTA, A. R. O Estágio Atual e as Perspectivas das Aplicações do Laser Nd-YAG. Em: *Procesamiento de Materiales por Láser*. Ed. Da Facultad de Ingenieria da Universidade de Buenos Aires, pp. 3-9, 1999.

PRODUCTION OF LASER CLADDING COATING THROUGH QUASICRYSTALLINE Al-Co-Fe-Cr ALLOY

ABSTRACT

Coatings were produced from quasicrystalline alloy powder $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$ (at.%) by surface treatment, laser cladding and microstructurally characterized. The ingots were processed by rapid solidification by spray forming, with subsequent realization of Laser Cladding on commercially pure aluminum substrate. This process was carried out with ytterbium fiber laser by varying the laser parameters produced in each track, yielding various conditions by combination of parameters. Characterization was carried out by microscopic techniques, X-ray diffraction and mechanical Vickers microhardness testing, analyzing the interface between the coating and the substrate. The coating of $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$ (at.%) alloy laser cladding presented a refined microstructure containing the $\mu\text{-Al}_5\text{Co}_2$ and $\text{M-Al}_{13}\text{Co}_4$ phases. In microhardness tests, the coatings exhibit hardness values between 310 and 719 HV, significant values for Al alloy base, which opens prospects for applications requiring high wear resistance.

Key-words: Quasicrystalline alloys, Al-based alloys, Laser Cladding, microstructure characterization.