

OTIMIZAÇÃO DA PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA PARA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE LAE $\text{AlCo}_2\text{Cr}_2\text{FeNi}_2^*$

Iana Costa Carvalho¹

Paulo Davi Borges Esteves²

Ygor Pereira de Lima³

Andrey Mariano dos Santos⁴

Talita Gama de Sousa⁵

Andersan dos Santos Paula⁶

Marcelo Henrique Prado da Silva⁷

Rodolfo da Silva Teixeira⁸

Resumo

Durante muitos anos, as ligas convencionais foram base para o desenvolvimento de novos materiais metálicos, com propriedades melhores que as até então conhecidas. No entanto, na última década, as Ligas de Alta Entropia (LAE) trazem uma nova abordagem para a produção de materiais avançados, com excelentes propriedades e potencial para diversas aplicações. Em particular, as ligas do sistema Al-Co-Cr-Fe-Ni também se destacam por promoverem uma classe de LAE de baixa densidade e têm sido foco de inúmeros estudos no meio acadêmico atual. O presente artigo traz um estudo de otimização da preparação metalográfica da liga $\text{AlCo}_2\text{Cr}_2\text{FeNi}_2$, a partir de 3 rotas diferentes de polimento e suas análises via microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de Raios X (DRX). Além disso, foram avaliadas as modificações estruturais da liga em função de um tratamento térmico de solubilização (1050 °C por 1 hora seguido de resfriamento em água). Os resultados das análises demonstraram a rota de polimento eletrolítico promissora para a caracterização da LAE em questão e a análise conjunta dos resultados de DRX e MEV, somado ao confronto com a literatura, permitiram identificar as fases presentes e suas modificações microestruturais em função do tratamento térmico.

Palavras-chave: Ligas de Alta Entropia; Preparação Metalográfica; Tratamento térmico de Solubilização.

METALLOGRAPHIC PREPARATION OPTIMIZATION FOR $\text{AlCo}_2\text{Cr}_2\text{FeNi}_2$ HEA MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION

Abstract

For many years, the traditional alloys were the basis for the development of new materials, with better properties than those until known. However, over the last decade, High Entropy Alloys (HEA) bring a new approach to the production of advanced materials, with excellent properties and bridged for various applications. In particular, Al-Co-Cr-Fe-Ni alloys are also notable for promoting a low-density HEA class and have been the focus of numerous studies in the current academic setting. The present article presents an optimization study of the $\text{AlCo}_2\text{Cr}_2\text{FeNi}_2$ alloy metallographic preparation from 3 different polishing routes and their analyzes by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). In addition, the structural modifications of the alloy were evaluated as a function of a solubilization heat treatment (1050 °C for 1 hour followed by cooling in water). The results of the analyzes demonstrated the promising electrolytic polishing route for the characterization of the LAE in question and the combined analysis of the results of XRD and SEM, added to the confrontation with the literature, allowed to identify the present phases and their microstructural modifications as a function of the heat treatment.

Keywords: High Entropy Alloy; Metallographic Preparation; Solution Heat Treatment.

- ¹ *Graduanda em Eng. Materiais, Seção de Engenharia de Materiais (SE-8), Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ² *Graduando em Eng. Materiais, SE-8, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ³ *Graduando em Eng. Materiais, SE-8, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁴ *1º Tenente QMB, Graduando em Eng. Materiais, SE-8, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁵ *Bacharel em Química, M.Sc., D.Sc., Pesquisadora em Estágio Doutoral do Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais (PPGCM), SE-8, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁶ *Eng. Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Professora Associada dos cursos de graduação em Eng. Materiais e PPGCM, SE-8, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁷ *Eng. Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Professor Associado dos cursos de graduação em Eng. Materiais e PPGCM, SE-8, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁸ *Eng. Metalurgista, M.Sc., Doutorando do PPGCM, SE-8, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, as ligas convencionais são objeto de estudo e pesquisa por todo mundo devido as suas propriedades mecânicas aperfeiçoadas em relação ao metal puro e à ampla diversidade de microestruturas complexas que tais sistemas apresentam. Nos últimos anos, as chamadas Ligas de Alta Entropia, ou LAE, deram origem a uma nova classe de sistemas de multicomponentes, proporcionando uma abordagem diferente para o desenvolvimento de materiais avançados com propriedades únicas, inalcançáveis pelas ligas convencionais.

Tais ligas, são constituídas por cinco ou mais elementos metálicos em equivalentes ou semelhantes proporções atômicas. Sua característica mais marcante é a capacidade de seus elementos constituintes se apresentarem em solução sólida com estruturas cristalinas simples, como cúbica de corpo centrado (CCC), cúbica de face centrada (CFC) e hexagonal compactada (HC), estabelecendo uma forma imprevisível e intuitivamente contraditória ao nível de complexidade esperado [1].

A justificativa para tais sistemas apresentarem estabilidade em solução sólida é seu alto valor de entropia, fazendo com que a energia livre de Gibbs para essas fases seja bastante negativa e, assim, mais estáveis [1]. A entropia de ligas metálicas em solução sólida é majoritariamente calculada pela contribuição da entropia configuracional do sistema, obtida pela equação (1):

$$\Delta S_m = -R[X_A \ln X_A + X_B \ln X_B + X_C \ln X_C + \dots] \quad (1)$$

Onde X_A , X_B , X_C , ... são as frações molares dos elementos de liga e R é a constante universal dos gases. Tendo em vista que essa função de variação de entropia molar (equação 1) é maximizada para as proporções equiatômicas das frações molares, as LAEs acabam possuindo um aspecto termodinâmico em relação ao seu grau de desordem benéfico para a formação dessas estruturas simples.

As LAEs apresentam elevada dureza, excelente resistência ao desgaste, boas características de resistência a fadiga, excelente resistência em altas temperaturas, boa estabilidade térmica, e em geral boa resistência à oxidação e à corrosão. Logo, as LAEs possuem um grande potencial para inúmeras aplicações, por conta, principalmente, dessa sua capacidade de possuir um amplo leque de propriedades físicas e químicas que são inalcançáveis pelas ligas convencionais [2].

De forma geral, um ou dois elementos de liga em baixas proporções são introduzidos no material puro, dando origem às ligas convencionais, a fim de deformar sua rede cristalina e impedir o escorregamento nos sistemas de deslizamento. Dessa forma, é conferido dureza ao material e, em contrapartida, ele também se torna mais frágil, pois sua então habilidade de deformação mecânica foi dificultada. O mesmo acontece com a estrutura cristalina das ligas de alta entropia, como pode ser observado na Figura 1 [3]. No entanto, diferentemente dessas ligas convencionais, as LAEs que possuem duas fases simples coexistindo apresentam a capacidade de alterar sua estrutura cristalina quando sofrem deformação mecânica. A energia absorvida pelo material durante a deformação é utilizada para transformar uma fase em outra, fornecendo ductilidade ao material e atribuindo a elas esse comportamento mecânico bastante atrativo para diversas aplicações [3].

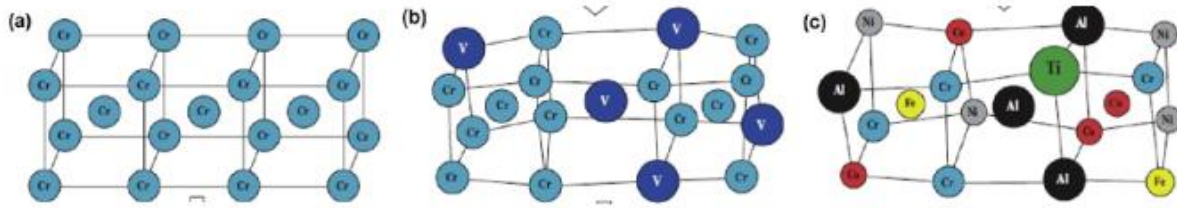


Figura 1. (a) Estrutura cristalina perfeita de cromo puro. (b) Rede cristalina distorcida da liga Cr-V. (c) Rede cristalina distorcida de uma liga de alta entropia do sistema Al-Co-Cr-Fe-Ni-Ti [3].

Ademais, a LAE que terá foco no presente estudo se trata da liga $\text{AlCo}_2\text{Cr}_2\text{FeNi}_2$. O sistema Al-Co-Cr-Fe-Ni tem atraído bastante atenção devido as suas características de baixa densidade, e, assim, por promover uma nova classe de ligas estruturais para aplicações aeronáuticas e automobilísticas. Além disso, essas ligas são também orientadas para aplicações em altas temperaturas. Logo, a estabilidade térmica das mesmas é um fator essencial para a determinação da potencialidade de suas propriedades e aplicações. Na literatura [4], já existem muitas pesquisas sobre essas ligas com base principalmente na determinação de seu diagrama de fase e sua evolução microestrutural. Nesse sentido, o presente estudo visa a definição de uma rota de preparação metalográfica otimizada e a caracterização das fases observadas na liga como fundida e após tratamento térmico de solubilização. O início desta pesquisa foi conduzido por ESTEVES (2019) no seu trabalho de iniciação a pesquisa do curso de graduação de Engenharia Metalúrgica do Instituto de Militar de Engenharia [5].

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 – Materiais e Métodos

2.1.1 – Materiais

Os materiais utilizados na produção da liga em estudo foram:

- Alumínio: folha de alumínio comercialmente puro associada a liga denominada AA 1235, doada pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), com sua composição determinada por fluorescência de raios X (99,22%Al);
- Ferro: barra de ferro comercialmente puro, com sua composição determinada por fluorescência de raios X (99,25%Fe);
- Níquel: pó de níquel de alta pureza fornecido pela empresa Brats, conforme especificado possui pelo menos 99,56%Ni;
- Titânio: pó de titânio grau 1 hidretado-dehidretado (HDH) fornecido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), conforme especificado possui pelo menos 99,41%Ti;
- Pó de cobalto e de cromo de alta pureza: os pós de cobalto e cromo foram doados pelo departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo (USP), Campus Lorena.

2.1.2 – Métodos

Inicialmente, foi realizado o balanço de carga, a partir da conversão da relação de percentual atômico em percentual em massa, dos pós de alta pureza dos elementos

para a formação da liga $\text{AlCo}_2\text{Cr}_2\text{FeNi}_2$. Dessa forma, utilizou-se 1,2632 g de Fe comercialmente puro e, mantendo-se as proporções, foram adicionados os outros elementos, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Massa dos constituintes da LAE resultante do balanço de carga para fusão.

Componente	Massa (g)
Al	0,6100
Co	2,4396
Cr	2,6139
Fe	1,2632
Ni	2,7461

Após o balanço, os elementos na forma de pó foram prensados para possibilitar a fusão no forno de fusão a arco elétrico (VAR) juntamente com elementos na forma massiva (alumínio e ferro). O forno de fusão constituído de um cadinho de cobre refrigerado à água e eletrodo não consumível de tungstênio. O processo de fusão, para abertura e manutenção do arco elétrico, ocorreu sob uma atmosfera de argônio com pressão de 8,3 mbar. O lingote obtido para este estudo foi fundido com tensão e amperagem de 8,5 V e 35 A, respectivamente, e em seguida refundido com 16 V e 180 A.

Com uso de uma máquina de corte de precisão com disco diamantado, foram extraídas duas amostras do lingote com aproximadamente 1 mm de espessura. Uma das amostras foi mantida apenas fundida, enquanto a outra foi posteriormente submetida a um tratamento térmico de solubilização, no qual foi introduzida em um forno tipo mufla já encharcado a 1050°C. A mesma permaneceu no forno por 1 hora após a reestabilização da temperatura de encharque, e em seguida foi resfriada em água.

Após o processo de fusão/refusão e tratamento térmico, as duas amostras, que são identificadas ao longo do artigo como LAE-F (amostra fundida) e LAE-T (amostra tratada), foram embutidas em resina condutora de cura a frio com partículas de cobre. Em seguida foram preparadas por um processo metalográfico de lixamento e polimento.

A fase de lixamento foi composta pelo desbaste consecutivo com as lixas d'água de 80, 120, 220, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2200 e 4000 Mesh. Já na fase de polimento as amostras foram submetidas a 3 rotinas diferentes descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Rotinas de polimento exploradas para otimização da preparação metalográfica.

Rotas	Polimento
1	Polimento mecânico com pasta de diamante 6, 3 e 1 μm .
2	Idem 1 com adicional de uma série de 5 polimentos com sílica coloidal por 5 min cada intercalados com 12 minutos de ultrassom para remoção da camada superficial de sílica aderida.
3	Idem 1 com adicional do polimento eletrolítico com solução de 20% de ácido perclórico em álcool etílico P.A. com tensão de 25 V por 5 segundos.

Após a preparação das amostras, elas foram analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca FEI, modelo Quanta 250 FEG, com canhão de emissão de campo (FEG), e uso dos detectores de elétrons secundários (SE) e retroespalhados (BSE). Os parâmetros utilizados na aquisição das micrografias no

MEV foram de 10 kV, 4 de spot size e uma distância de trabalho de aproximadamente 10 mm. Somado à análise no MEV, as amostras foram caracterizadas por difração de Raios X (DRX) com uso do difratômetro de fabricante PANalytical, modelo XPERT PRO MRD, com as amostras preparadas de acordo com a rota 2 (conforme Tabela 2). Os parâmetros utilizados na medição foram: variação de 2θ entre 20 e 100, acoplamento $\frac{\theta}{2\theta}$, passo de 0,3 e tempo por passo de 300 s, com radiação de Co K α , 40 mA e tensão de 40 kV.

2.2 – Resultados e Discussão

2.2.1 – Análise em MEV (SE e BSE)

Nas Figuras de 2 a 7 são apresentadas as micrografias obtidas com os detectores de SE e BSE nas análises conduzidas no MEV para as amostras LAE-F e LAE-T, em função das distintas rotas de polimento adotadas na preparação metalográfica (Tabela 2). Dessa forma, foi possível obter informações topográficas e morfológicas da superfície preparada das LAE's resultante da análise com o detector de SE. Além disso, nas micrografias oriundas do detector de BSE foi possível identificar, por contraste de composição em função do número atômico médio dos elementos presentes em cada região, diferentes fases no material.

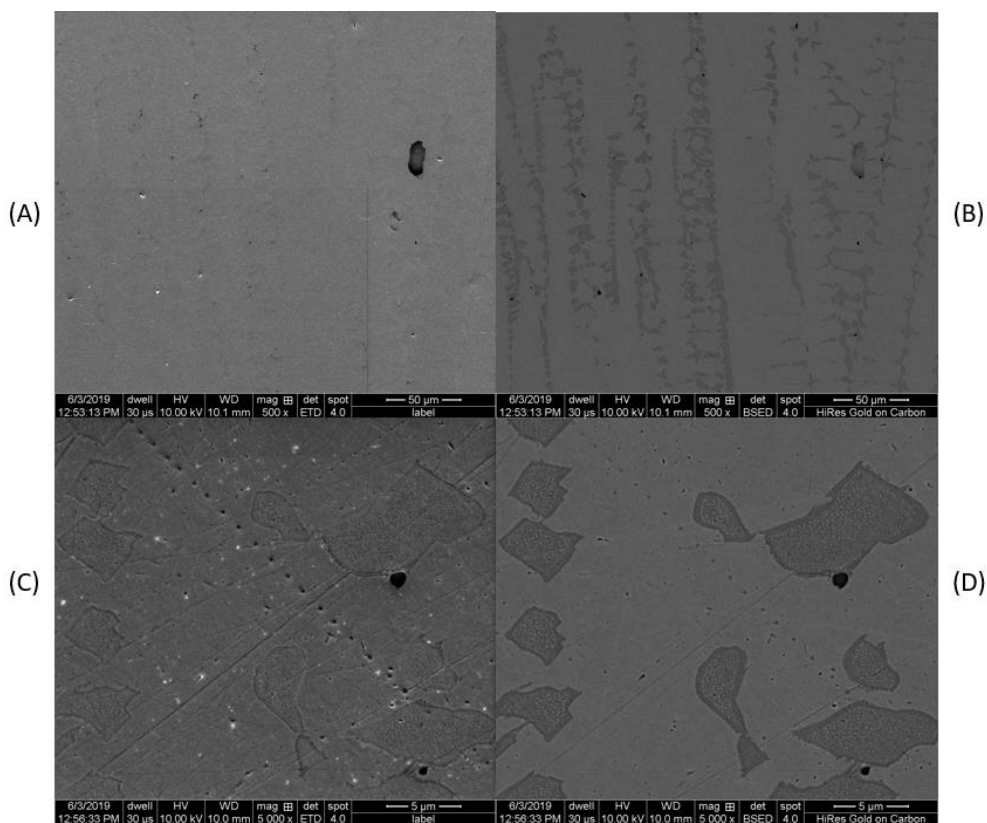


Figura 2. Rota 1 de polimento: Aspecto microestrutural revelado com os detectores (A) – SE LAE-F 500x; (B) – BSE LAE-F 500x; (C) – SE LAE-F 5000x; (D) – BSE LAE-F 5000x.

Com base na rota de polimento 1 (Tabela 2) são apresentadas as micrografias referentes as amostras LAE-F e LAE-T nas Figuras 2 e 3. Comparando as micrografias de SE para ambas as ligas, é notado que o polimento somente com pasta de diamante até 1 μ m promoveu uma superfície plana para ambas as

condições fundida e tratada, dificultando a distinção das fases no material, em função de distinção topográfica. Já nas micrografias de BSE, é possível detectar detalhes das microestruturas das fases presentes nas duas condições. Nota-se também a presença de artefatos de preparação na forma de riscos, oriundos da etapa de lixamento, para observações em maiores aumentos e significativamente mais grosseiros para a amostra LAE-F (Figura 2c,d).

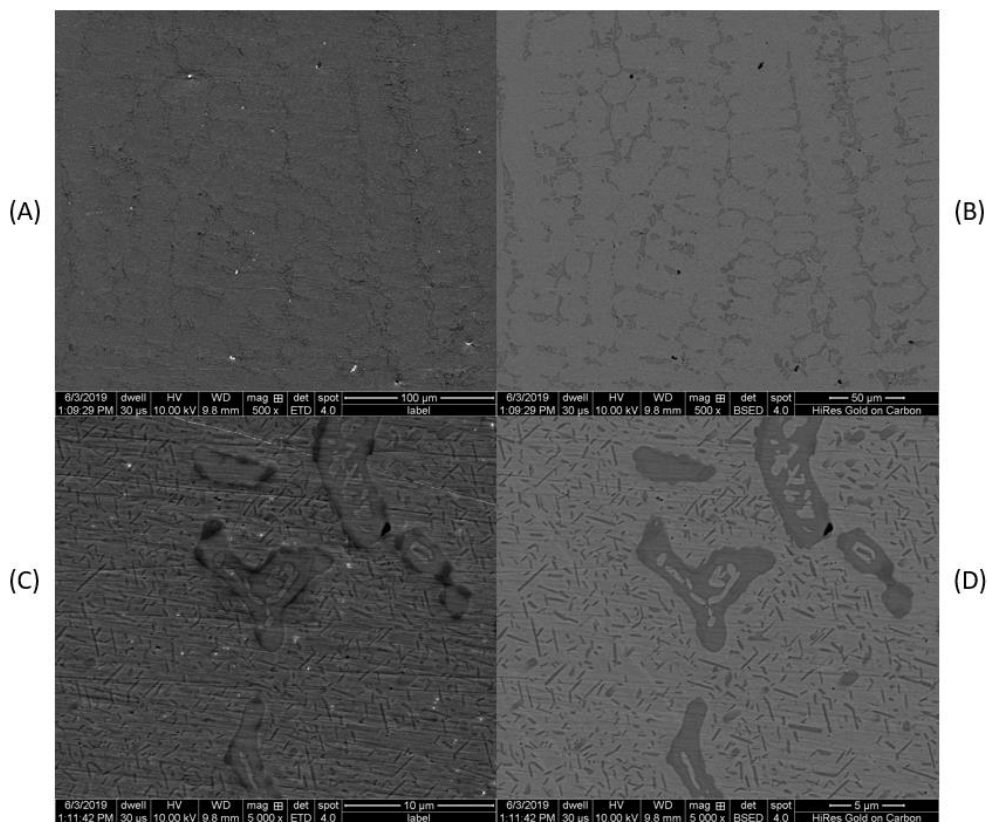


Figura 3. Rota 1 de polimento: Aspecto microestrutural revelado com os detectores (A) – SE LAE-T 500x; (B) – BSE LAE-T 500x; (C) – SE LAE-T 5000x; (D) – BSE LAE-T 5000x.

Nas imagens retratadas nas Figuras 4 e 5, com base na rota de polimento 2 (Tabela 2), é possível observar nas micrografias de SE para LAE-F, em ambos aumentos, a topografia da superfície e, no aumento de 5000x, detalhes da microestrutura. No caso da LAE-T, só é possível identificar melhor as fases no aumento de 5000x. Nas micrografias de BSE, os detalhes das microestruturas são melhor revelados em todas as condições, até mesmo em aumentos menores. Em relação a presença de artefatos de preparação na forma de riscos, como observados no Rota 1 (Figuras 2 e 3), o polimento com a sílica coloidal foi capaz eliminá-los por completo na superfície da amostra LAE-T (Figura 5c,d) e suavizá-los na amostra LAE-F (Figura 4c,d).

Já nas Figuras 6 e 7 são representados os resultados da rota 3 com polimento eletrolítico para as duas condições fundida e tratada. As micrografias obtidas via SE e BSE apresentaram um melhor resultado em relação aos outros polimentos, indicando um melhor delineamento das fases nas respectivas microestruturas das amostras LAE-F e LAE-T por essa rota de polimento. É possível identificar ainda outras fases e detalhes nas microestruturas, devido ao surgimento de tonalidades diferentes na estrutura observadas nas micrografias via BSE, a citar os precipitados lenticulares formados na matriz metálica em função do tratamento térmico de

solubilização (Figura 7d) e a diferença de orientação dos grãos da matriz metálica pelo contraste de orientação (Figuras 6b,d e 7b,d).

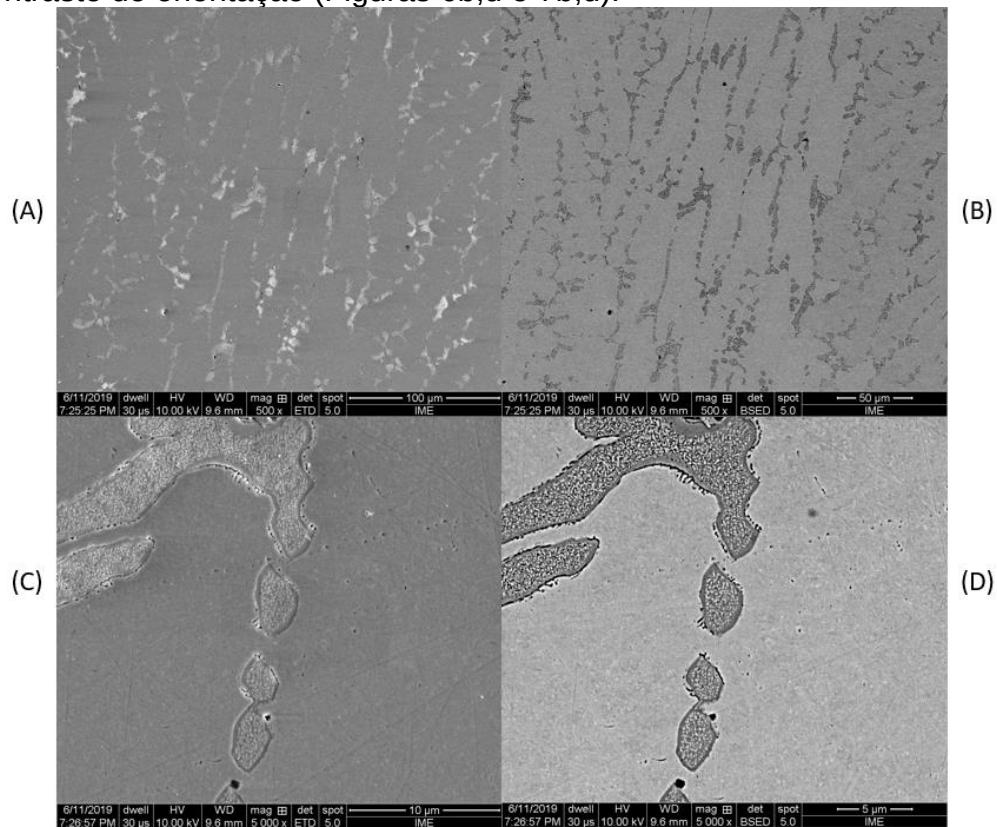


Figura 4. Rota 2 de polimento: Aspecto microestrutural revelado com os detectores (A) – SE LAE-F 500x; (B) – BSE LAE-F 500x; (C) – SE LAE-F 5000x; (D) – BSE LAE-F 5000x.

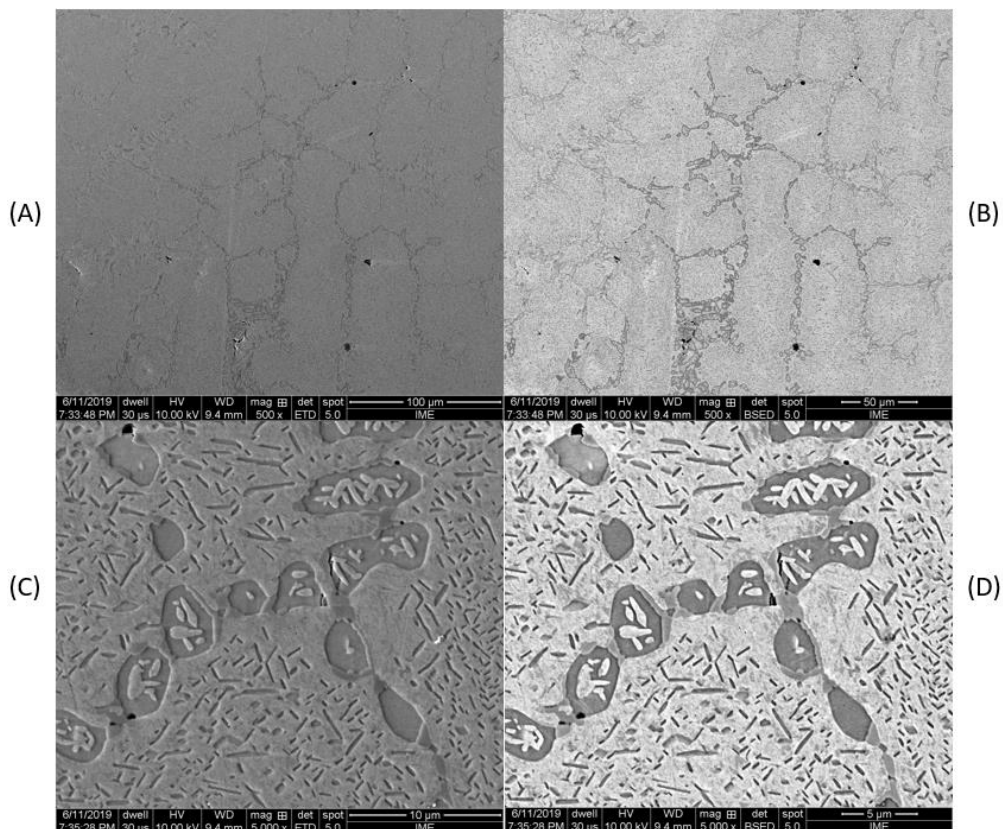


Figura 5. Rota 2 de polimento: Aspecto microestrutural revelado com os detectores (A) – SE LAE-T 500x; (B) – BSE LAE-T 500x; (C) – SE LAE-T 5000x; (D) – BSE LAE-T 5000x.

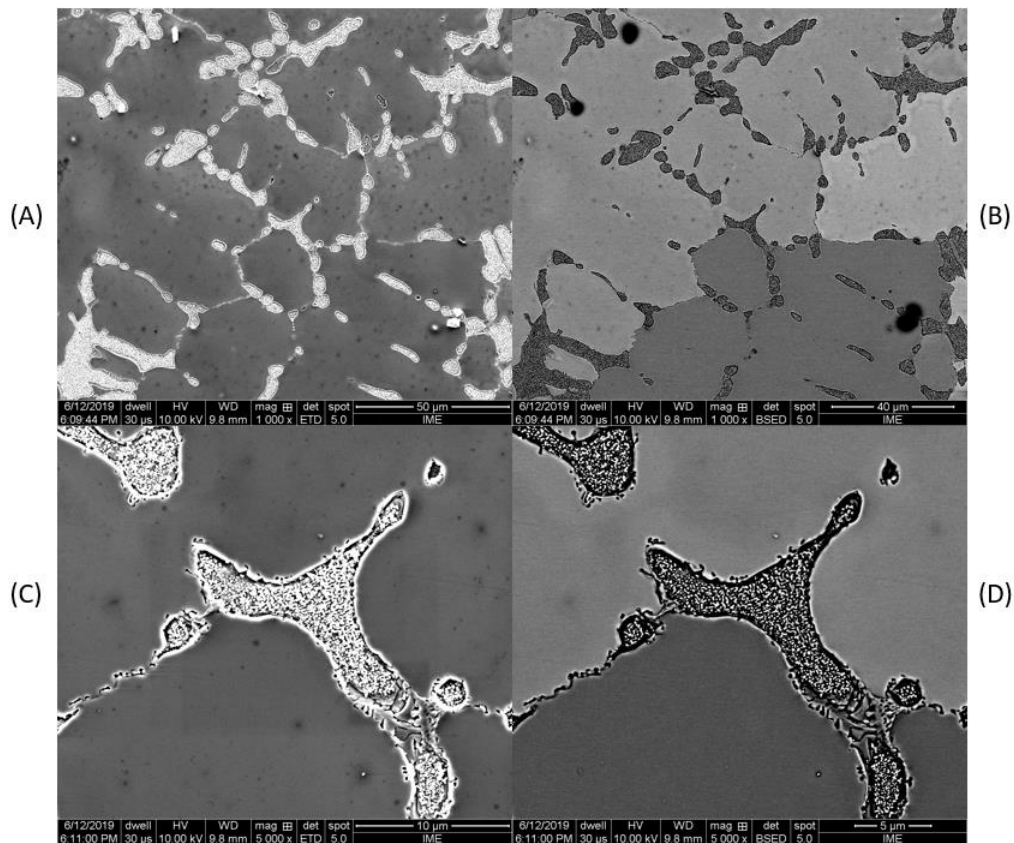


Figura 6. Rota 3 de polimento: Aspecto microestrutural revelado com os detectores (A) – SE LAE-F 1000x; (B) – BSE LAE-F 1000x; (C) – SE LAE-F 5000x; (D) – BSE LAE-F 5000x.

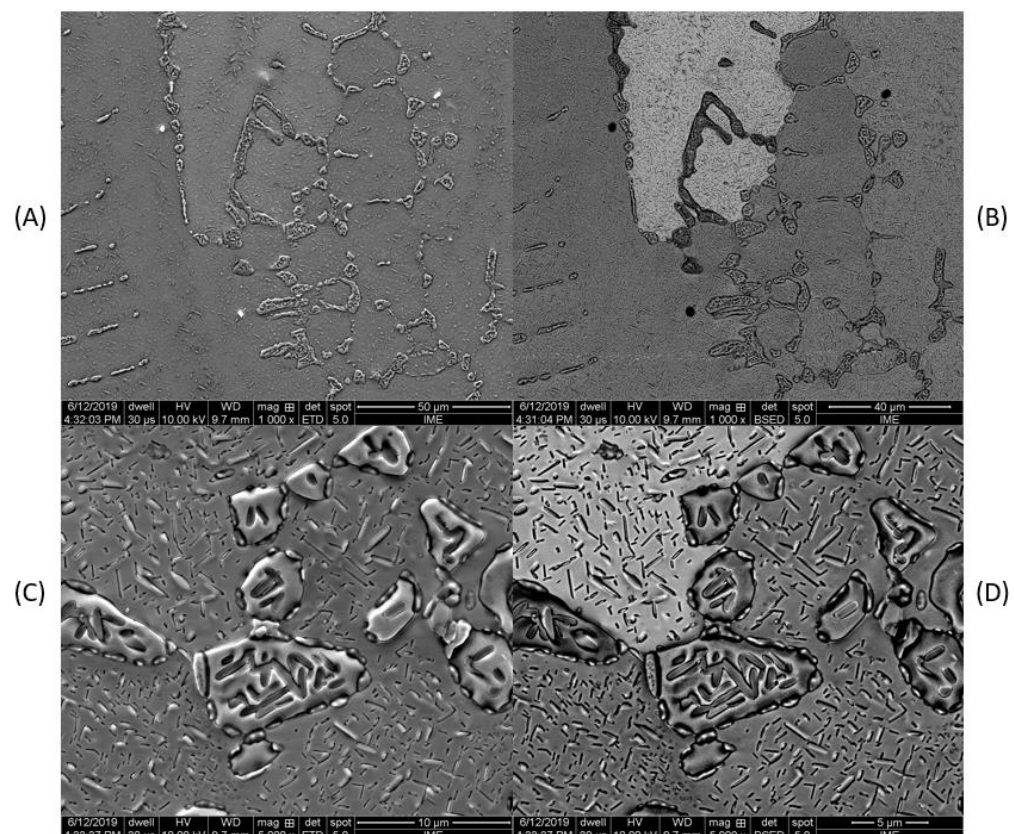
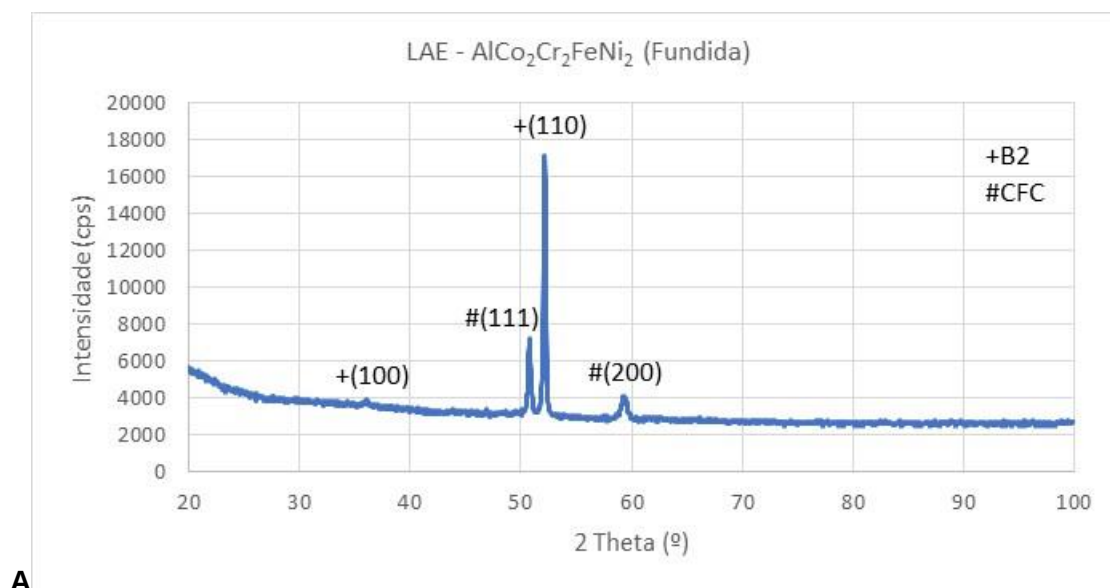


Figura 7. Rota 3 de polimento: Aspecto microestrutural revelado com os detectores (A) – SE LAE-T 1000x; (B) – BSE LAE-T 1000x; (C) – SE LAE-T 5000x; (D) – BSE LAE-T 5000x.

No entanto, também é possível observar que o polimento eletrolítico acabou promovendo a dissolução de uma fase nas amostras tanto na condição fundida como na tratada. Pode-se melhor identificar essa dissolução comparando as Figuras 4d e 6d para a LAE-F e as Figuras 5c e 7c. Essa dissolução indica que os parâmetros empregados no polimento eletrolítico devem ser ajustados, fazendo com que as microestruturas das LAE's não sejam alteradas e possam ser analisadas de forma mais fiel às composições originais e à rota de processamento para fabricação (solidificação e/ou tratamento térmico de solubilização).

2.2.2 – Análise de DRX

O uso da técnica de difração de raios X teve como objetivo definir as fases presentes em função da sua estrutura cristalina e estimar seus parâmetros de rede da liga em estudo nas duas condições de processamento (Figura 8). Em função da dissolução de fases ocorrida no polimento eletrolítico, as amostras foram analisadas no difratômetro de Raios X na condição de preparação da rota 2, ou seja, como polimento final com sílica coloidal.



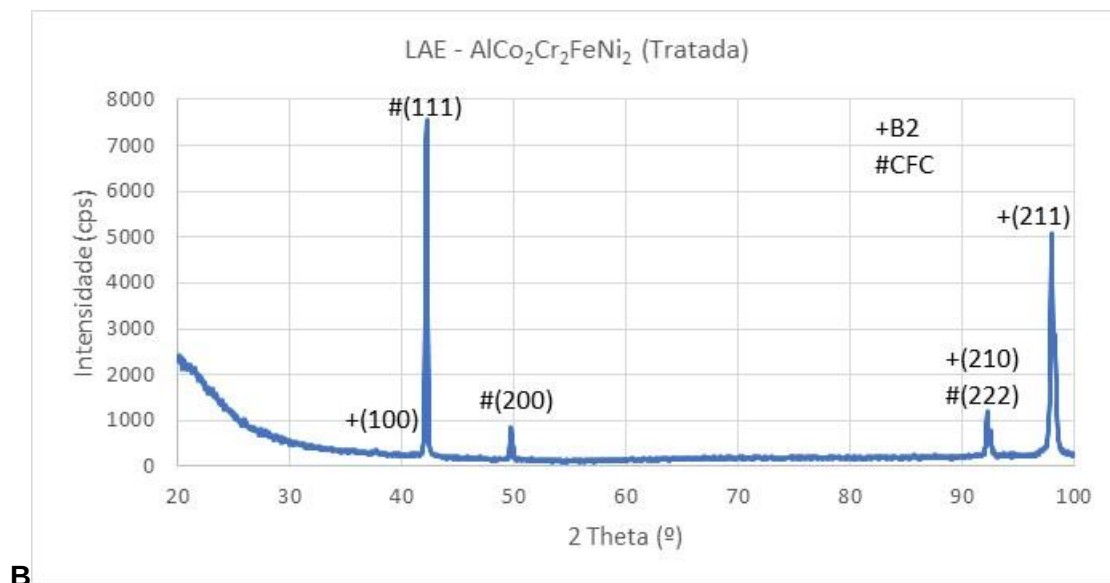


Figura 8. Difratogramas de Raios X das amostras (a) LAE-F e (b) LAE-T.

A análise da DRX da LAE-F, apresentada na Figura 8a, aponta duas fases preponderantes, uma fase B2 com picos de difração (100) e (110) e parâmetro de rede $a = 2,85 \text{ \AA}$, e outra fase CFC com picos de difração (111) e (200) e parâmetro de rede $a = 3,61 \text{ \AA}$.

Em função do tratamento térmico de solubilização adotado ($1050 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 h), Apesar da amostra LAE-T, houve um incremento no parâmetro de rede da estrutura CFC para aproximadamente $4,27 \text{ \AA}$ na amostra LAE-T, devido a uma saturação de soluto em sua solução sólida, resultando em um deslocamento para valores menores de 2θ para os picos de difração (111) e (200) e surgimento de uma nova orientação (222). Por outro lado, para a fase B2 houve uma redução no parâmetro de rede para aproximadamente $2,8 \text{ \AA}$, com redução da orientação associada ao plano (100), completo consumo da orientação (110) presente na condição fundida, e surgimento de duas orientações vinculadas aos planos (210) e (211).

Dessa forma, entende-se que a matriz metálica se refere a fase CFC e os precipitados, tanto na condição fundida como na condição tratada, referem-se a fase B2.

2.2.2 – Considerações Finais

No decorrer do estudo, algumas características da liga em questão nas condições fundida e tratada foram analisadas. Uma delas, foi que a LEA-T apresentou uma excelente resistência a corrosão ao sair praticamente intacta do forno (evidenciada pela manutenção da sua massa antes e após o tratamento), o qual estava com atmosfera ao ar, evidenciando seu potencial para aplicações em altas temperaturas. Além disso, em função do seu melhor aspecto quando da adoção das rotas de polimento 1 (somente pasta de diamante) e 2 (com adicional de sílica coloidal), é um indicativo que sua modificação microestrutural e distribuição de fases resultou em modificações no seu comportamento mecânico com um provável endurecimento.

Para continuidade deste estudo e ampla caracterização pretende-se realizar análise mais aprofundadas via MEV por meio de mapeamento composicional das fases via espectrômetro de energia dispersiva (EDS) e micro/mesotextura via difração de elétrons retroespalhados (EBSD). Além de medidas de microdureza convencional e

instrumentada, esta última com cargas diminutas com o intuito de distinguir a dureza e as propriedades mecânicas entre a matriz metálica e a segunda fase.

3 CONCLUSÃO

No decorrer do estudo foi possível observar como a preparação metalográfica da amostra do material é fator determinante na obtenção de resultados. As análises em MEV das diferentes rotas de polimentos forneceu a possibilidade de se estabelecer a melhor rotina, entre as exploradas, para caracterização da liga $\text{AlCo}_2\text{Cr}_2\text{FeNi}_2$, que foi o polimento com pasta de diamante e adicional de polimento eletrolítico. No entanto, pela dissolução de segunda fase durante o polimento eletrolítico com os parâmetros adotados inviabilizou a análise de DRX nesta condição, fazendo necessário o uso do polimento final com sílica coloidal.

Outro ponto relevante, foi a mudança estrutural observada em função do tratamento térmico de solubilização, 1050°C por 1h, o qual promoveu uma redução na fração volumétrica no composto de segunda fase associado a fase B2 presente na condição fundida, na região interdendrítica, e formação de precipitado vinculado a fase B2, com formato de lentes, no interior do grão da matriz metálica de estrutura CFC.

Agradecimentos

Os autores agradecem a professora Maria Ismênia Sodero Toledo Faria (D.Sc.) e o doutorando Julio Cesar Lourenço (M.Sc.), da Universidade de São Paulo (USP), campus Lorena-SP, pela doação dos pós de Cr e Co. Ao professor Dilson da Silva Santos (D.Sc.) da COPPE/UFRJ (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro), pela fusão da liga no forno de fusão/refusão a arco elétrico. Ao Instituto Militar de Engenharia (IME) pela infraestrutura e materiais de consumo disponibilizados para este estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 Marques SC. Síntese e Caracterização de Ligas de Elevada entropia configuracional (HEAs) Não Equiatômicas. [Projeto Final de Curso de Engenharia de Materiais]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.
- 2 Triveño Rios C, Lopes ESN, Caram R, Kiminami CS. Processamento e Caracterização de Ligas de Alta Entropia $\text{AlCoFeNiXTi}_{0,5}$ ($X = \text{Mn, V}$). Anais do 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 09 a 13 de Novembro de 2014, Cuiabá, MT, Brasil. 2014. p. 4528-4536.
- 3 Zhang Yong, Zuo TT, Tang Z, Gao MC, Dahmen KA, Liaw PK, et al. Microstructures and Properties of High-Entropy Alloys. *Progress in Materials Science*. 2014. 61:1-93.
- 4 Zhang C, Zhang F, Diao H, Gao MC, Tang Z, Poplawsky JD, et al. Understanding Phase Stability of Al-Co-Cr-Fe-Ni High Entropy Alloys. *Materials and Design*. 2016. 109:425-433.
- 5 Esteves PDG. Obtenção e caracterização de ligas de alta entropia do sistema Al-Co-Cr-Fe-Ni(Ti) como fundidas. [Projeto de Iniciação a Pesquisa do Curso de Engenharia Metalúrgica]. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia. 2019.