

ESTUDO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO DO COMPÓSITO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA7075 REFORÇADA COM 5% DE CARBONETO DE TITÂNIO, PROCESSADO POR METALURGIA DO PÓ

Guilherme Luiz Leão Melo ⁽¹⁾ (guilherme.luix@ufpe.br), Aline Ferro Corrêa ⁽¹⁾ (alineferro.eng@gmail.com), João Lucas Araujo da Silva ⁽¹⁾ (joao.jlas@ufpe.br), Moisés Euclides da Silva Junior ⁽¹⁾ (juniormois7@hotmail.com), Oscar Olimpio de Araujo Filho ⁽¹⁾ (oscar.oaraujo@ufpe.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE); Departamento de Engenharia Mecânica

RESUMO: As ligas de alumínio AA7075, amplamente utilizadas em indústrias como a aeroespacial e automotiva, são conhecidas por sua combinação de leveza e alta resistência mecânica, além de uma excelente resistência à corrosão. O reforço com partículas de carbeto de titânio (TiC) tem mostrado potencial para melhorar ainda mais essas propriedades, tornando os compósitos resultantes especialmente valiosos em aplicações que demandam alta resistência e durabilidade. Este estudo focou na avaliação de um compósito de matriz metálica fabricado utilizando a técnica de metalurgia do pó, empregando a liga AA7075 com reforço de 5% de TiC, com o objetivo de aumentar a dureza do material. Para isso, foram aplicados tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento artificial, que induzem a formação de precipitados endurecedores, os quais impedem o movimento de discordâncias dentro da estrutura cristalina do material, resultando em um aumento significativo da dureza. As amostras produzidas foram caracterizadas utilizando técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) e submetidas a ensaios de microdureza Vickers. Os resultados demonstraram que os tratamentos térmicos foram eficazes, cumprindo o objetivo de elevar a dureza do compósito, sugerindo sua adequação para uso em ambientes de alta exigência mecânica.

PALAVRAS-CHAVE: METALURGIA DO PÓ, TRATAMENTOS TÉRMICOS, SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO.

STUDY OF SOLUBILIZATION AND AGING HEAT TREATMENTS OF AA7075 ALUMINUM ALLOY COMPOSITE REINFORCED WITH 5% TITANIUM CARBIDE, PROCESSED BY POWDER METALLURGY

ABSTRACT: AA7075 aluminum alloys, widely used in industries such as aerospace and automotive, are known for their combination of lightness and high mechanical strength, as well as excellent corrosion resistance. Reinforcement with titanium carbide (TiC) particles has shown the potential to further improve these properties, making the resulting composites especially valuable in applications that demand high strength and durability. This study focused on the evaluation of a metal matrix composite manufactured using the powder metallurgy technique, using the AA7075 alloy with 5% TiC reinforcement, with the aim of increasing the material's hardness. To this end, solubilization and artificial ageing heat treatments were applied, which induce the formation of hardening precipitates, which prevent the movement of dislocations within the crystalline structure of the material, resulting in a significant increase in hardness. The samples produced were characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and Vickers microhardness tests. The results showed that the heat treatments were effective, fulfilling the objective of increasing the hardness of the composite, suggesting its suitability for use in highly mechanically demanding environments.

KEYWORDS: POWDER METALLURGY, HEAT TREATMENTS, SOLUBILIZATION AND AGEING.

1. INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio são materiais de extrema relevância na indústria moderna, particularmente em setores como a aeroespacial e automotiva, devido à sua combinação de baixa densidade e alta resistência mecânica. Entre as várias ligas disponíveis, a liga AA7075 destaca-se por seu excelente desempenho em aplicações que exigem alta resistência à tração e boa resistência à corrosão, sendo amplamente utilizada na fabricação de componentes estruturais críticos, como peças de aeronaves e automóveis de alta performance (Davis, 1993). A AA7075 é uma liga de alumínio da série 7000, que é endurecida por precipitação, contendo zinco como seu principal elemento de liga, além de magnésio e cobre. A combinação desses elementos confere à AA7075 propriedades mecânicas superiores, comparadas a outras ligas de alumínio, tornando-a ideal para aplicações em que a resistência é um fator crucial (ASM International, 1990).

Entretanto, apesar de suas excelentes propriedades, a busca por materiais com desempenho ainda mais elevado tem levado ao desenvolvimento de compósitos, onde a matriz metálica é reforçada com partículas cerâmicas, como o carvão de titânio (TiC). O TiC é um material cerâmico conhecido por sua dureza extrema e alta estabilidade térmica, características que o tornam um excelente candidato para reforço de ligas metálicas. Quando incorporado à matriz de alumínio, o TiC pode melhorar significativamente a resistência ao desgaste e a dureza do material, sem comprometer as outras propriedades desejáveis da liga (Rajan, Pillai, & Pai, 1998).

A técnica de metalurgia do pó tem sido amplamente utilizada na fabricação de compósitos metálicos reforçados com partículas cerâmicas. Essa técnica oferece diversas vantagens, como a capacidade de produzir materiais com composições uniformes e microestruturas controladas, além de ser economicamente viável para produções em larga escala (German, 1996). No contexto da fabricação de compósitos de matriz de alumínio reforçados com TiC, a metalurgia do pó permite uma distribuição homogênea das partículas cerâmicas na matriz metálica, resultando em um material com propriedades mecânicas superiores (Chawla, Chawla, & Suryanarayana, 1993).

Para melhorar ainda mais as propriedades mecânicas dos compósitos de alumínio reforçados com TiC, tratamentos térmicos, como a solubilização e o envelhecimento artificial, são frequentemente aplicados. Esses tratamentos térmicos promovem a formação de precipitados endurecedores na matriz metálica, que atuam como barreiras para o movimento de discordâncias na estrutura cristalina do material. Isso resulta em um aumento significativo da dureza e da resistência ao desgaste do compósito, tornando-o ainda mais adequado para aplicações exigentes (Totten & MacKenzie, 2003).

A caracterização das propriedades dos compósitos fabricados é uma etapa crucial no desenvolvimento de novos materiais. Técnicas como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) são amplamente utilizadas para analisar a

microestrutura dos materiais e identificar a distribuição e a composição das fases presentes. Além disso, ensaios de microdureza, como o ensaio de Vickers, são realizados para avaliar a dureza dos materiais e confirmar a eficácia dos tratamentos térmicos aplicados (Callister & Rethwisch, 2002).

Este estudo foca na Avaliação de um compósito de matriz metálica fabricado utilizando a liga de alumínio AA7075 reforçada com partículas de TiC, empregando a técnica de metalurgia do pó e tratamentos térmicos para melhorar sua dureza mecânica. A eficácia dos tratamentos térmicos aplicados foi avaliada através de análises microestruturais e ensaios de microdureza, demonstrando o potencial do compósito para aplicações que requerem materiais de alta resistência mecânica e durabilidade.

1.1 Objetivos

A pesquisa tem como objetivo principal estudar um Compósito de Matriz Metálica (CMM) utilizando a liga de alumínio AA7075 como matriz e o carboneto de titânio como reforço particulado. Especificamente, pretende-se estudar os efeitos dos tratamentos térmicos de envelhecimento e solubilização no CMM, analisar a dureza e a microestrutura após esses tratamentos, aumentar a dureza e a resistência mecânica do compósito, além de comparar e avaliar os resultados dos ensaios realizados antes e após os tratamentos térmicos.

1.2 Justificativas

A realização desta pesquisa é justificada pela necessidade de desenvolver materiais avançados que combinem as melhores propriedades de cerâmicas e metais, visando aplicações em setores que demandam alta resistência mecânica e durabilidade, como a indústria aeroespacial e automotiva. O compósito de matriz metálica (CMM) proposto, com uma matriz de alumínio AA7075 e reforço de carboneto de titânio, promete melhorar significativamente as propriedades mecânicas, como dureza e tenacidade, sem comprometer a conformabilidade. A análise dos efeitos dos tratamentos térmicos nesse CMM pode levar a avanços importantes na produção de materiais mais leves e resistentes, essenciais para inovações tecnológicas e industriais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras fabricadas via metalurgia do pó foram tratadas termicamente conforme os procedimentos que serão abordados nessa seção.

2.1 Fabricação do compósito

Os compósitos foram fabricados utilizando os pós elementares dos elementos constituintes em tempos de moagem de alta energia diferentes (30, 60 e 120 min) em um moinho vibratório do

tipo SPEX. Logo após foram compactados e sinterizados para melhoria da resistência. A partir dessa etapa que se inicia o objetivo principal dessa pesquisa, que consiste na aplicação dos tratamentos térmicos e avaliação das propriedades mecânicas e estruturais do material.

2.2 Tratamentos térmicos

O ponto central deste projeto de pesquisa é a execução dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento das amostras, fundamentais para o mecanismo de endurecimento do material através da formação de precipitados. Para realizar esses tratamentos, foi utilizado o forno tipo mufla do laboratório de metalurgia do pó no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) da UFPE, seguindo as condições de temperatura apropriadas para as ligas de alumínio da série 7XXX. Inicialmente, as amostras passaram por um tratamento de solubilização a 480°C durante 90 minutos, seguido de um rápido resfriamento em água à temperatura ambiente. Após a solubilização, foi realizado o envelhecimento térmico das amostras a 120°C por 3 horas, seguido de um resfriamento lento dentro do próprio forno.

2.3 Preparação e Caracterização das amostras

Após os tratamentos térmicos, foi realizado o embutimento das amostras, um procedimento que envolve a inserção das amostras em moldes poliméricos, facilitando o manuseio nas etapas seguintes do estudo. Esses moldes foram criados combinando a resina em pó de copolímero de metil metacrilato (PMMA-EA) com um catalisador, em uma proporção de 2 para 1 em massa.

O lixamento e polimento das amostras, assim como a anterior, faz parte da preparação metalográfica, em que os corpos de prova foram preparados para os subseqüentes ensaios. Todos os procedimentos dessa fase foram realizados nos laboratórios do INTM da UFPE.

Primeiramente, foi realizado um lixamento manual úmido utilizando uma máquina de lixamento semiautomático. As lixas foram usadas em ordem crescente de granulometria: 240, 320, 400, 600, 800 e 1200. O processo começou com a lixa mais grossa (240) para remover as maiores imperfeições da superfície, deixando apenas as marcas da lixa. Em seguida, as amostras foram rotacionadas em 90° e o lixamento prosseguiu até alcançar o melhor acabamento. Após o lixamento, as amostras foram limpas com água e álcool, seguidas de secagem.

Após o lixamento, foi realizada a etapa de polimento com o auxílio de uma máquina politriz. Utilizando um pano de polimento e uma pasta lubrificante de alumina, as amostras foram polidas com movimentos contrários ao da máquina até que a superfície ficasse livre de riscos, pronta para as análises metalográficas.

Na etapa de caracterização, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers no laboratório do INTM da UFPE, utilizando o microdurômetro Emcotest - modelo Durascan. O ensaio envolveu a

aplicação de uma carga de 0,1kgf em 10 pontos de cada área das amostras (longitudinal e transversal), com ampliação de 50 vezes e um tempo de endentação de 15 segundos.

A análise mais detalhada da microestrutura das amostras foi feita com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de bancada Hitachi TM 3000, que permitiu imagens com ampliações de até x5000. A partir dessas micrografias, foi realizada a análise da composição química das amostras utilizando o espectrômetro de dispersão de energia (EDS).

3. RESULTADOS

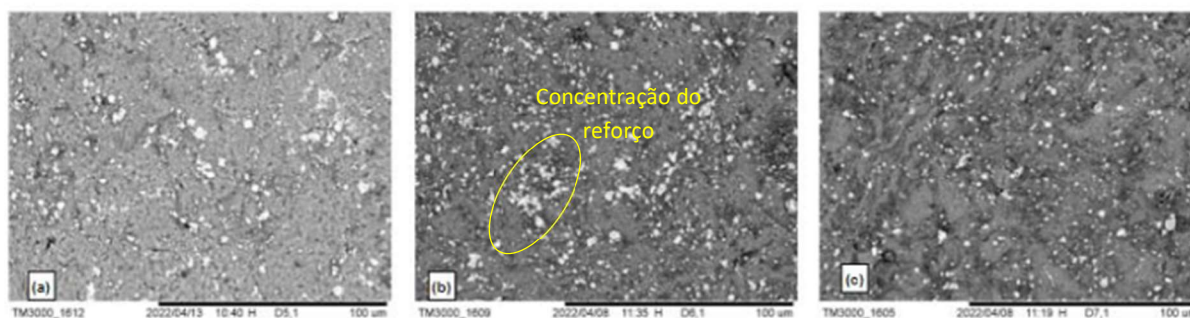
Os resultados das caracterizações e avaliação do comportamento mecânico das amostras obtidos através dos ensaios realizados serão abordados nessa seção.

3.1 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva

Com base na análise das micrografias apresentadas na Figura 1 e Figura 2, observou-se a formação de uma estrutura em camadas, ou lamelar, perpendicular à direção da compactação. De acordo com Santos (2017), essa morfologia é resultado da fusão sucessiva de camadas, formando uma estrutura em camadas soldadas.

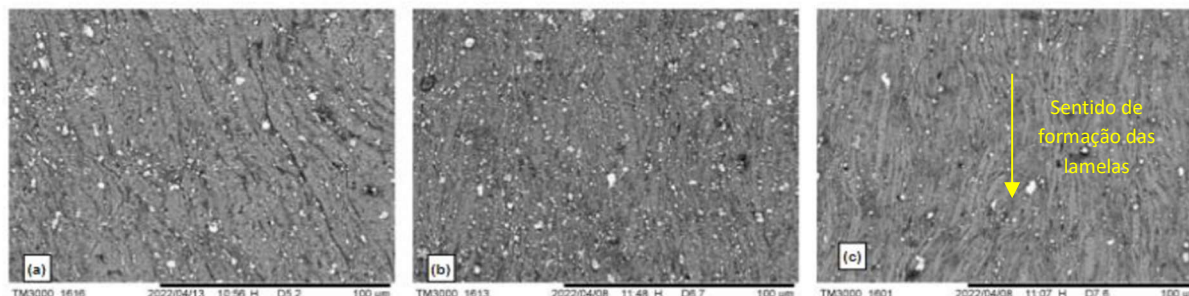
Além disso, a microestrutura apresenta uma morfologia irregular, com contornos de grão pouco definidos ou ausentes. Essa característica é atribuída aos processos de fratura e soldagem repetidos, resultantes da moagem de alta energia. No entanto, é perceptível que com o aumento do tempo de moagem se observa uma maior incorporação do reforço na matriz do material.

FIGURA 1. MEV da amostra AA7075 + 5% TiC, Região transversal (a)30, (b)60, (c)120 min –1000x



Fonte: Autor (2022).

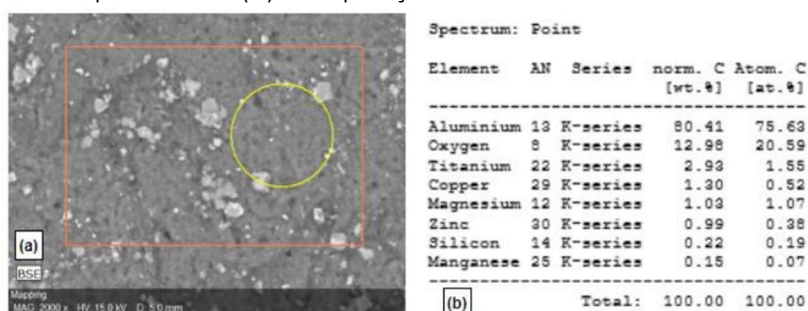
FIGURA 2. MEV da amostra AA7075 + 5% TiC, Região Longitudinal (a)30, (b)60, (c)120 min –1000x



Fonte: Autor (2022).

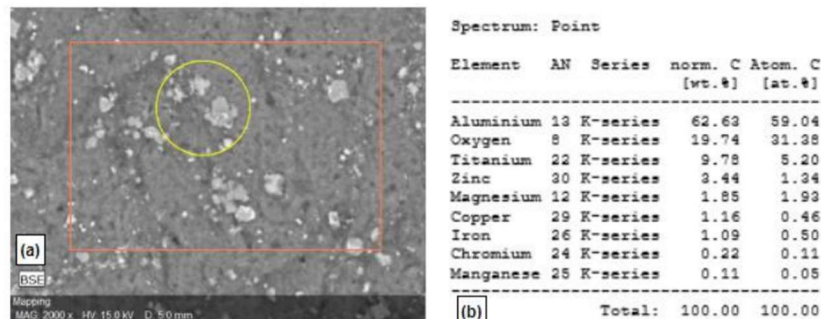
As imagens da análise do EDS das amostras que contém 5% de Carbetto de Titânio e um tempo de moagem de 30 minutos são mostradas em duas regiões diferentes a seguir. Na Figura 3 percebe-se a alta concentração do alumínio na região em destaque, o que representa a matriz do compósito. Já na Figura 4 destaca-se uma região diferente com uma relativa mudança na composição dos elementos encontrados, como uma maior concentração do reforço de titânio, além dos elementos que formam os precipitados endurecedores provenientes do tratamento térmico. Sendo estes possíveis precipitados $MgZn_2$, $Al_2Mg_3Zn_3$, Al_3Mg_5 de acordo com estudos acerca da liga AA7075 (BARBOSA, 2014).

FIGURA 3. - EDS da região transversal da amostra AA7075 + 5% TiC com 30 minutos de moagem: (a) Área selecionada para o EDS (b) Composição dos elementos encontrados na amostra.



Fonte: Autor (2022).

FIGURA 4. EDS da região transversal da amostra AA7075 + 5% TiC com 30 minutos de moagem em região com concentração do reforço: (a) Área selecionada para o EDS (b) Composição dos elementos encontrados na amostra.



Fonte: Autor (2022).

3.4 Microdureza Vickers

A Tabela 1 apresenta os valores de dureza Vickers (HV) para amostras com e sem tratamento térmico, divididas por tempo de moagem de alta energia (30min, 60min, 120min) e direção (longitudinal e transversal).

A tendência de aumento da dureza com o aumento do tempo de moagem indica que a moagem está efetivamente introduzindo defeitos e refinando o grão, preparando o material para um endurecimento mais eficiente durante o tratamento térmico. Além disso, O tratamento térmico, aplicado após a moagem, potencializa o endurecimento, provavelmente devido à formação de fases precipitadas ou ao refino adicional do grão. A combinação de moagem e tratamento térmico resulta em um material com dureza significativamente maior do que o material sem tratamento.

A diferença de dureza entre as direções longitudinal e transversal pode estar relacionada à orientação preferencial dos grãos, à distribuição de defeitos ou à presença de tensões residuais, que podem ser influenciadas tanto pela moagem quanto pelo tratamento térmico.

TABELA 1. Resultados do Ensaio de Microdureza Vickers (HV).

Tempo de moagem	Área	Sem Tratamento (HV)	Com Tratamento (HV)	Desvio Padrão
30min	Transversal	82	99,75	4,93
	Longitudinal	86	111,87	6,4
60min	Transversal	96	162	11,56
	Longitudinal	95	183,13	10,13
120min	Transversal	101	245,63	28,74
	Longitudinal	106	272,87	25,49

Fonte: Autor (2022).

4. CONCLUSÕES

A análise da composição química das regiões selecionadas no EDS encontra-se os elementos químicos previstos na amostra, visto que sua fabricação foi planejada, além destes elementos esperados, têm-se a presença de ferro em algumas regiões devido as impurezas durante o processo de fabricação via metalurgia do pó.

As morfologias com o aumento do tempo de moagem apresentaram uma maior incorporação do reforço na matriz de alumínio.

Os resultados obtidos demonstram a importância da combinação de moagem de alta energia e tratamento térmico para o controle e aumento da dureza do compósito

Houve um aumento significativo dos valores de dureza encontrados em relação as amostras antes do tratamento térmico, conforme esperado. Em todas as amostras ocorreu o aumento da propriedade de dureza, assim, comprovou-se o principal objetivo do trabalho obtendo maior dureza para o compósito de AA7075 com reforço de carbeto de titânio após a realização da solubilização seguida de envelhecimento.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, C. Metais não ferrosos e suas ligas: microestrutura, propriedades e aplicações. E-papers, Rio de Janeiro, Brasil, 532 p., 2014.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5.ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 589 p., 2002.

CHAWLA, Krishan K.; CHAWLA, Krishan K. Metal matrix composites. Springer New York, 1998.

DAVIS, Joseph R. et al. Aluminum and aluminum alloys. ASM international, 1993.

German, Randall M. *Powder Metallurgy Science*. 2nd ed, Metal Powder Industries Federation, 1994.

RAJAN TPD, PILLAI RM, PAI BC. Reinforcement coatings and interfaces in aluminium metal matrix composites. J Mater Sci, 1998.

SANTOS, E. N. Fabricação e caracterização da liga de alumínio AA4XXX a partir dos pós elementares de alumínio e silício via MP. 2017. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

TOTTEN, G. E., & MACKENZIE, D. S. Handbook of Aluminum: Volume 1: Physical Metallurgy and Processes. CRC Press, 2003.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de PE(FACEPE) pela concessão da Bolsa de Pesquisa que possibilitou a realização desse estudo. Agradeço, também, à Universidade Federal de Pernambuco - UFPE e ao Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) pelos recursos infraestruturais, indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.