

ESTUDO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO DO COMPÓSITO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA7075 REFORÇADA COM 15% DE CARBONETO DE TITÂNIO, PROCESSADO POR METALURGIA DO PÓ

Guilherme Luiz Leão Melo ⁽¹⁾ (guilherme.luix@ufpe.br), Ivan Bezerra de Mello Picchi ⁽¹⁾ (ivan.picchi@ufpe.br), 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: *Compostos de alumínio AA7075 reforçados com carbeto de titânio (TiC) apresentam grande potencial para aplicações que demandam alta resistência e leveza. Neste estudo, investigamos a influência de tratamentos térmicos na dureza de um compósito AA7075/TiC produzido por metalurgia do pó. A adição de 15% em volume de partículas de TiC contribui significativamente para o aumento da resistência ao desgaste e à fadiga. Os tratamentos térmicos de solubilização a 480°C por 90 min e envelhecimento a 120°C por 3 horas foram aplicados para promover a formação de precipitados intermetálicos, que atuam como barreiras ao movimento de discordâncias. A caracterização microestrutural por MEV e EDS confirmou a formação desses precipitados e a distribuição homogênea das partículas de TiC. Os ensaios de microdureza Vickers indicaram um aumento na dureza do compósito após os tratamentos térmicos, atingindo um valor máximo de 304,63HV. Essa melhoria é atribuída principalmente ao mecanismo de endurecimento por precipitação e ao efeito Hall-Petch, relacionado ao refinamento do grão. Os resultados obtidos demonstram a eficácia dos tratamentos térmicos em otimizar as propriedades mecânicas do compósito AA7075/TiC, tornando-o um material promissor para aplicações em diversas áreas, como a indústria aeroespacial e automotiva.*

PALAVRAS-CHAVE: METALURGIA DO PÓ, SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO, LIGA DE ALUMÍNIO AA 7075.

STUDY OF SOLUBILIZATION AND AGING HEAT TREATMENTS OF AA7075 ALUMINUM ALLOY COMPOSITE REINFORCED WITH 15% TITANIUM CARBIDE, PROCESSED BY POWDER METALLURGY

ABSTRACT: *Aluminum AA7075 composites reinforced with titanium carbide (TiC) have great potential for applications requiring high strength and lightness. In this study, we investigated the influence of heat treatments on the hardness of an AA7075/TiC composite produced by powder metallurgy. The addition of 15% TiC particles by volume contributes significantly to increased resistance to wear and fatigue. The heat treatments of solubilization at 480°C for 90 min and aging at 120°C for 3 hours were applied to promote the formation of intermetallic precipitates, which act as barriers to the movement of dislocations. Microstructural characterization by SEM and EDS confirmed the formation of these precipitates and the homogeneous distribution of the TiC particles. Vickers microhardness tests indicated an increase in the hardness of the composite after the heat treatments, reaching a maximum value of 304.63HV. This improvement is mainly attributed to the precipitation hardening mechanism and the Hall-Petch effect, related to grain refinement. The results obtained demonstrate the effectiveness of heat treatments in optimizing the mechanical properties of the AA7075/TiC composite, making it a promising material for applications in various areas, such as the aerospace and automotive industries.*

KEYWORDS: POWDER METALLURGY, SOLUBILIZATION AND AGEING, AA7075 ALUMINUM ALLOY

1. INTRODUÇÃO

A contínua busca por materiais que combinem alta resistência mecânica com baixo peso tem sido um dos principais motivadores para o desenvolvimento de materiais avançados. Dentre as inovações mais notáveis nesse campo, os compósitos metal-cerâmica se destacam, sendo formados pela dispersão de partículas cerâmicas em uma matriz metálica. Essa combinação resulta em materiais que apresentam propriedades singulares, como alta resistência ao desgaste, à fadiga e à corrosão, características que os tornam ideais para aplicações em setores que demandam desempenho elevado, como as indústrias aeroespacial e automotiva (TORRALBO, 2019)

A matriz metálica desses compósitos, frequentemente composta por alumínio ou suas ligas, é responsável por fornecer a ductilidade e a tenacidade necessárias ao material. Por outro lado, as partículas cerâmicas, como o carbeto de titânio (TiC), são fundamentais para garantir a rigidez e a resistência ao desgaste (GUO et al., 2020). A interface entre a matriz metálica e as partículas cerâmicas é crucial, pois a adesão eficaz entre essas fases assegura a transferência eficiente de tensões, prevenindo o descolamento e a propagação de trincas, o que é essencial para manter as propriedades mecânicas do compósito (JIANG et al., 2018)

Além disso, as propriedades mecânicas desses compósitos são fortemente influenciadas por sua microestrutura. A distribuição, o tamanho e a morfologia das partículas cerâmicas, juntamente com a presença de defeitos cristalinos, como discordâncias e vazios, impactam diretamente a resistência, a ductilidade e a tenacidade do material (FANG et al., 2016).

Os tratamentos térmicos representam uma ferramenta poderosa para modificar a microestrutura dos compósitos metal-cerâmica e, assim, melhorar suas propriedades mecânicas. O envelhecimento artificial, por exemplo, promove a formação de precipitados intermetálicos na matriz metálica, os quais atuam como barreiras ao movimento das discordâncias, aumentando a resistência do material à deformação plástica. Este processo, conhecido como endurecimento por precipitação, é amplamente utilizado para aprimorar as propriedades mecânicas tanto de ligas metálicas quanto de compósitos (ZHANG et al., 2021).

Especificamente, a liga de alumínio AA7075 é amplamente reconhecida por sua alta resistência e boa ductilidade, sendo comumente utilizada em aplicações aeroespaciais e automotivas. A incorporação de partículas de carbeto de titânio (TiC) a esta liga resulta em um compósito com propriedades mecânicas ainda mais aprimoradas, incluindo uma maior resistência ao desgaste, à fadiga e à corrosão. Estas características fazem do compósito AA7075-TiC uma excelente escolha para aplicações que requerem materiais com desempenho mecânico excepcional e durabilidade prolongada (LI et al., 2017).

1.1 Objetivos

Neste trabalho, investigamos a influência dos tratamentos térmicos na dureza de um compósito de alumínio AA7075 reforçado com 15% em volume de partículas de TiC, produzido por metalurgia do pó. Através da caracterização microestrutural e dos ensaios de microdureza, buscamos compreender os mecanismos de endurecimento e otimizar as propriedades mecânicas do material.

1.2 Justificativas

A crescente demanda por materiais que aliem alta resistência, leveza e durabilidade tem impulsionado a busca por novas soluções na indústria. Os compósitos metálicos reforçados com partículas cerâmicas, como o alumínio AA7075 reforçado com carvão de titânio (TiC), apresentam um grande potencial para atender a essas demandas, especialmente em setores como o aeroespacial e automotivo.

Este estudo se justifica pela necessidade de aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos que levam à melhoria das propriedades mecânicas desses materiais. Ao investigar a influência dos tratamentos térmicos na dureza do compósito AA7075/TiC, busca-se: otimizar as propriedades mecânicas, expandir o conhecimento científico e aumentar a competitividade industrial.

Com isso, este estudo contribui para o desenvolvimento de materiais avançados com alto potencial de aplicação em diversas áreas, além de gerar novos conhecimentos científicos e tecnológicos.

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

A síntese dos compósitos iniciou-se com a preparação de pós elementares, os quais foram submetidos a um processo de moagem em alta energia para promover a homogeneização e redução do tamanho de partícula. As misturas resultantes foram compactadas sob alta pressão e, posteriormente, sinterizadas em atmosfera controlada, visando a obtenção de peças densas e coesas. A etapa seguinte envolveu a aplicação de tratamentos térmicos específicos, com o intuito de induzir modificações microestruturais e, conseqüentemente, alterar as propriedades mecânicas dos materiais. Através da caracterização microestrutural e de ensaios mecânicos, foi possível avaliar a influência dos tratamentos térmicos na melhoria das características dos compósitos.

2.2 Tratamentos térmicos

Aos compósitos foram submetidas a um tratamento térmico específico, composto pelas etapas de solubilização a 480°C por 90 minutos e envelhecimento a 120°C por 3 horas. Esse processo térmico tem como objetivo induzir o endurecimento por precipitação, mecanismo que consiste na formação de partículas finas e dispersas na matriz, dificultando o movimento das discordâncias e, consequentemente, aumentando a dureza do material.

2.3 Preparação e Caracterização das amostras

Para revelar a microestrutura e avaliar a dureza dos compósitos após os tratamentos térmicos, as amostras foram submetidas a uma rigorosa preparação metalográfica. Após o encapsulamento em resina epóxi para maior rigidez, as amostras foram lixadas e polidas mecanicamente, resultando em uma superfície espelhada. A microdureza Vickers foi então utilizada para quantificar o endurecimento da liga, através da aplicação de uma carga de 0,1 kgf em diferentes pontos da superfície.

Os compósitos, após os tratamentos térmicos, passaram por um processo de preparação metalográfica que incluiu o encapsulamento em resina epóxi para maior rigidez, lixamento mecânico com lixas de granulometria crescente (de 240 a 1200) para remoção de imperfeições e polimento mecânico com pasta de diamante para obter um acabamento espelhado. A microestrutura revelada foi analisada por meio de ensaios de microdureza Vickers, onde uma carga de 0,1 kgf foi aplicada para determinar a resistência à penetração do material.

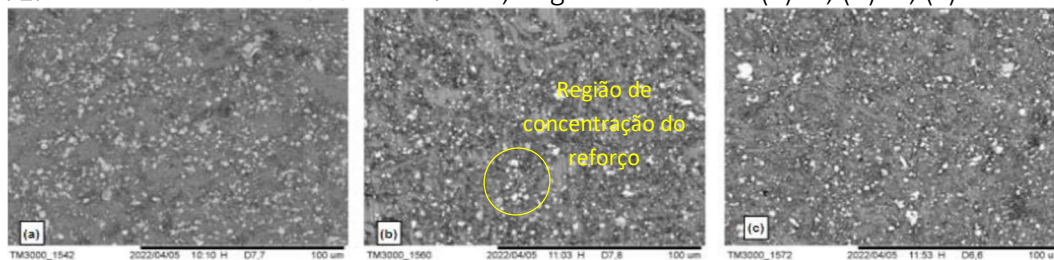
3. RESULTADOS

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

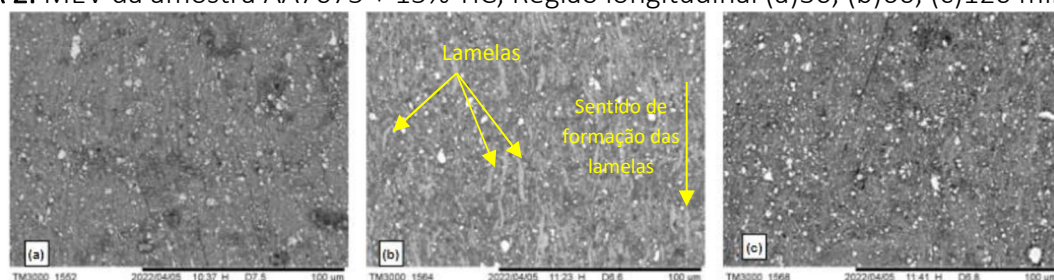
O aumento do tempo de moagem promoveu uma substancial redução no tamanho das lamelas características da microestrutura inicial, resultando em um refinamento da matriz. Essa evolução microestrutural, observada nas micrografias por MEV, é consequência dos processos de fratura e soldagem que ocorrem durante a moagem. A incorporação do reforço particulado na matriz se mostrou mais eficiente com o aumento do tempo de moagem, indicando uma melhor dispersão e interação entre as fases constituintes do compósito, conforme mostrado na Figura 1 e Figura 2. Essa melhoria na microestrutura resultou em um aumento significativo da dureza do material, conforme evidenciado pelos ensaios de microdureza.

FIGURA 1. MEV da amostra AA7075 + 15% TiC, Região transversal (a)30, (b)60, (c)120 min –1000x



Fonte: Autor (2022).

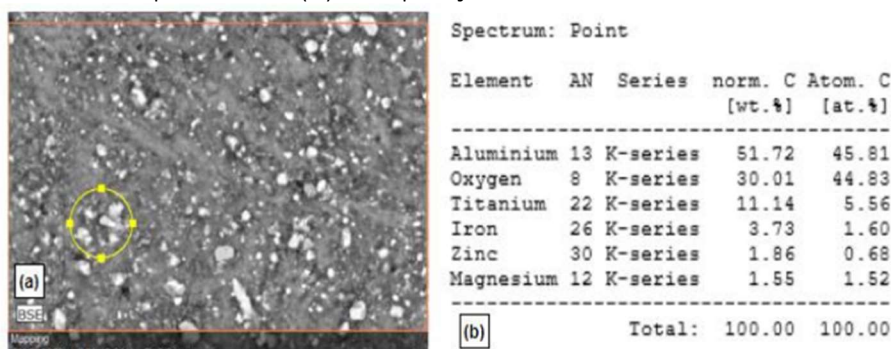
FIGURA 2. MEV da amostra AA7075 + 15% TiC, Região longitudinal (a)30, (b)60, (c)120 min –1000x



Fonte: Autor (2022).

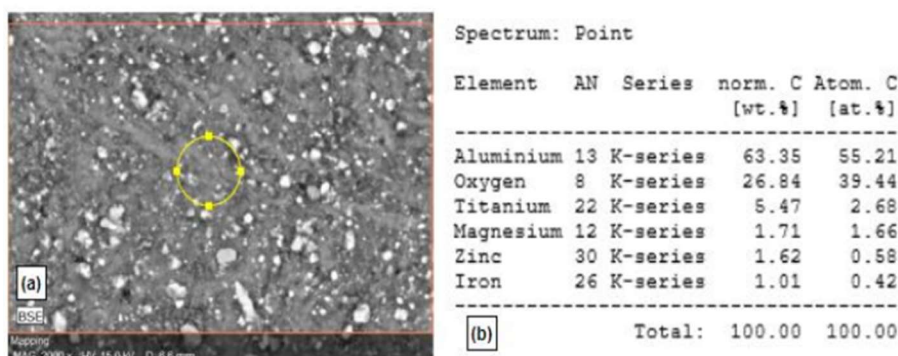
A análise EDS das amostras contendo 15% de carbeto de titânio, após 120 minutos de moagem, revelou informações essenciais sobre a composição química e a microestrutura do compósito. A Figura 3 destaca uma região onde a matriz é dominada por alumínio, confirmando a predominância desse elemento na estrutura do compósito. Em contraste, na Figura 4, é possível observar uma área com uma composição química específica, marcada por uma concentração elevada de titânio e outros elementos associados aos precipitados que aumentam a dureza do material. Essa diversidade na composição química evidencia tanto a incorporação do carbeto de titânio quanto a formação de precipitados intermetálicos durante o tratamento térmico, ambos fundamentais para o fortalecimento e a resistência do material.

FIGURA 3. - EDS da região transversal da amostra AA7075 + 15% TiC com 120 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 + 15% TiC com 120 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 resultados do ensaio de microdureza Vickers (HV) para amostras submetidas a diferentes tempos de moagem. Com base nela é notável um aumento claro na dureza com o aumento do tempo de moagem. As amostras transversais e longitudinais mostram um aumento progressivo de 107 HV e 122 HV, respectivamente, após 30 minutos de moagem, para 172 HV e 173 HV após 120 minutos. Este aumento sugere que a moagem prolongada refina a microestrutura e melhora a distribuição das partículas de carbeto de titânio, resultando em maior resistência.

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

Tempo de moagem	Área	Sem Tratamento (HV)	Com Tratamento (HV)	Desvio Padrão
30min	Transversal	107	205	32,43
	Longitudinal	122	209,87	23,44
60min	Transversal	136	266,25	27,26
	Longitudinal	160	270	28,4
120min	Transversal	172	248,75	16,94
	Longitudinal	173	304,63	22,7

Fonte: Autor (2022).

Além disso, o tratamento térmico eleva ainda mais a dureza do compósito em todas as condições de moagem. Observa-se um aumento substancial na dureza com 30 minutos de moagem, com valores passando de 205 HV (transversal) e 209,87 HV (longitudinal). Com 60 minutos de moagem, as amostras apresentam a maior dureza registrada na tabela, atingindo 266,25 HV (transversal) e 270 HV (longitudinal), indicando que esse tempo de moagem pode ser ideal para maximizar os efeitos do tratamento térmico. No entanto, com 120 minutos de moagem, os valores de dureza ainda são elevados, mas ligeiramente inferiores aos de 60 minutos, sugerindo uma possível saturação ou leve deterioração das propriedades mecânicas devido ao excesso de moagem.

O tratamento térmico aumenta significativamente a dureza em todas as amostras. No entanto, o aumento é mais pronunciado em tempos de moagem menores, como 30 e 60 minutos. Isso indica que o tratamento térmico é especialmente eficaz em amostras com microestruturas não completamente refinadas, onde os precipitados endurecedores formados durante o tratamento têm um impacto mais significativo. Para 120 minutos de moagem, a dureza é elevada, mas o incremento em relação ao estado sem tratamento é menos acentuado, sugerindo que o benefício adicional do tratamento térmico pode diminuir após um certo ponto de moagem.

4. CONCLUSÕES

A dureza do compósito de matriz de alumínio AA7075 reforçado com carvão de titânio é altamente influenciada tanto pelo tempo de moagem quanto pelo tratamento térmico. O tempo de moagem de 60 minutos combinado com o tratamento térmico parece oferecer a melhor combinação de refinamento da microestrutura e formação de precipitados endurecedores, resultando nas maiores durezas observadas. No entanto, tempos de moagem mais longos (120 minutos) ainda proporcionam alta dureza, mas com ganhos reduzidos após o tratamento térmico.

O tratamento térmico de solubilização seguido de envelhecimento artificial aplicado ao compósito de matriz metálica AA7075, reforçado com 15% de carbeto de titânio (TiC), promoveu um aprimoramento significativo nas propriedades mecânicas do material, com ênfase na elevação da dureza. A formação de precipitados intermetálicos foi determinante, atuando como barreiras para o movimento de discordâncias e, conseqüentemente, aumentando a resistência à deformação plástica.

Adicionalmente, a análise microestrutural revelou que o refinamento da microestrutura proporcionado pelo tratamento térmico contribuiu para uma maior homogeneidade do material, refletindo diretamente no aumento da resistência global. Os ensaios de microdureza Vickers confirmaram que o tempo de moagem desempenhou um papel crucial na dureza do compósito, com um incremento gradual à medida que o tempo de moagem foi prolongado. Esse efeito é atribuído à melhoria na distribuição e interação das partículas de TiC dentro da matriz de alumínio, resultando em uma dispersão mais uniforme e em uma microestrutura mais fina.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

FANG, H., ZHANG, H., WANG, Y. Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Matrix Composites Reinforced with Titanium Carbide Nanoparticles. *Materials Science and Engineering A*, v. 673, p. 74-81, 2016.

GUO, Q., SHEN, C., LIU, J. Influence of Titanium Carbide (TiC) on Mechanical Properties and Wear Resistance of Aluminum Matrix Composites. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 821, p. 153535, 2020.

JIANG, W., LI, C., DING, H. Interface Characterization and Strengthening Mechanisms in Al-TiC Composites. *Acta Materialia*, v. 154, p. 292-304, 2018.

LI, X., HUANG, Y., YANG, Y. Microstructure and Properties of TiC Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 6, p. 388-395, 2017.

TORRALBO, M. S. Nanocomposites Metal-Ceramics: Materials, Processing, and Applications. *Ceramics International*, v. 45, p. 27645-27653, 2019.

ZHANG, X., WU, Y., ZHAO, Z. Effects of Precipitation Hardening on the Microstructure and Mechanical Properties of Al7075 Matrix Composites Reinforced with TiC Nanoparticles. *Journal of Materials Science*, v. 56, p. 1493-1506, 2021.

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.