

ESTUDO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO DO COMPÓSITO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA7075 REFORÇADA COM 10% DE CARBONETO DE TITÂNIO, PROCESSADO POR METALURGIA DO PÓ

Guilherme Luiz Leão Melo⁽¹⁾ (guilherme.luix@ufpe.br), Inaldo Amorim da Silva⁽²⁾ (inaldoamorim@recife.ifpe.edu.br), João Lucas Araujo da Silva⁽¹⁾ (joao.jlas@ufpe.br), Moisés Euclides da Silva Junior⁽¹⁾ (juniormoisés7@hotmail.com), Oscar Olimpio de Araujo Filho⁽¹⁾ (oscar.oaraujo@ufpe.br)

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

⁽²⁾ Instituto Federal de Pernambuco; Departamento de Desenho

RESUMO: *Compostos de matriz metálica à base de ligas de alumínio AA7075 reforçadas com partículas de carbeto de titânio (TiC) têm se destacado no cenário industrial por suas propriedades mecânicas excepcionais, aliando leveza e alta resistência. Nessa pesquisa, investigamos a influência de tratamentos térmicos na dureza de um compósito de alumínio AA7075/TiC produzido via metalurgia do pó. A adição de 10% em volume de partículas de TiC visa aprimorar a resistência ao desgaste e à fadiga do material. Os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento foram empregados para promover a formação de precipitados intermetálicos, que atuam como obstáculos ao movimento de discordâncias, aumentando a resistência do material à deformação plástica. A caracterização microestrutural por MEV e EDS permitiu a análise da distribuição e morfologia das partículas de TiC e dos precipitados formados. Os resultados dos ensaios de microdureza Vickers indicaram um aumento significativo na dureza do compósito após os tratamentos térmicos, confirmando a eficácia da estratégia empregada. Esses resultados evidenciam o potencial do compósito de alumínio AA7075/TiC para aplicações em componentes estruturais que exigem alta resistência e durabilidade, como na indústria aeroespacial e automotiva.*

PALAVRAS-CHAVE: METALURGIA DO PÓ, SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO, COMPÓSITO DE MATRIZ METÁLICA

STUDY OF SOLUBILIZATION AND AGING HEAT TREATMENTS OF AA7075 ALUMINUM ALLOY COMPOSITE REINFORCED WITH 10% TITANIUM CARBIDE, PROCESSED BY POWDER METALLURGY

ABSTRACT: *Metal matrix composites based on AA7075 aluminum alloys reinforced with titanium carbide (TiC) particles have stood out on the industrial scene for their exceptional mechanical properties, combining lightness and high strength. In this research, we investigated the influence of heat treatments on the hardness of an AA7075/TiC aluminum composite produced via powder metallurgy. The addition of 10% TiC particles by volume aims to improve the material's resistance to wear and fatigue. Solubilization and aging heat treatments were used to promote the formation of intermetallic precipitates, which act as obstacles to the movement of disagreements, increasing the material's resistance to plastic deformation. Microstructural characterization by SEM and EDS allowed analysis of the distribution and morphology of the TiC particles and the precipitates formed. The results of the Vickers microhardness tests indicated a significant increase in the hardness of the composite after the heat treatments, confirming the effectiveness of the strategy employed. These results show the potential of the AA7075/TiC aluminum composite for applications in structural components that require high strength and durability, such as in the aerospace and automotive industries.*

KEYWORDS: POWDER METALLURGY, SOLUBILIZATION AND AGEING, METAL MATRIX COMPOSITE.

1. INTRODUÇÃO

A busca por materiais com alta resistência, leveza e durabilidade impulsiona a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais avançados. Dentre as diversas opções, os compósitos de matriz metálica à base de ligas de alumínio têm se destacado por suas propriedades excepcionais, encontrando ampla aplicação em setores como aeroespacial, automotivo e naval. A liga de alumínio AA7075, em particular, é reconhecida por sua alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão, tornando-a um material estratégico em diversas aplicações (KIM et al., 2015).

Com o objetivo de otimizar ainda mais as propriedades mecânicas da liga AA7075, a adição de reforços particulados tem sido uma estratégia eficaz. Dentre os diversos reforços, o carbetto de titânio (TiC) tem se mostrado promissor devido à sua alta dureza, resistência ao desgaste e boa compatibilidade com a matriz de alumínio (ZHANG et al., 2017). A combinação da liga AA7075 com partículas de TiC resulta em um compósito com propriedades mecânicas superiores, como maior resistência à tração, fadiga e desgaste, além de maior rigidez (LIU et al., 2019).

A metalurgia do pó é um processo de fabricação que tem sido amplamente utilizado para a produção de compósitos de matriz metálica, oferecendo diversas vantagens em relação aos processos convencionais. Essa técnica permite uma distribuição homogênea das partículas de reforço na matriz metálica, resultando em um material com propriedades mais uniformes (THOMAS et al., 2020). Além disso, a metalurgia do pó possibilita a fabricação de componentes com geometrias complexas e a produção de materiais com alta pureza.

Os tratamentos térmicos desempenham um papel fundamental na otimização das propriedades mecânicas dos compósitos de matriz metálica. No caso dos compósitos de alumínio reforçados com partículas cerâmicas, os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento são comumente utilizados para induzir a formação de precipitados intermetálicos na matriz de alumínio. Esses precipitados atuam como obstáculos ao movimento das discordâncias, dificultando a deformação plástica e aumentando a resistência do material (SRIVASTAVA et al., 2021).

A dureza é uma propriedade mecânica fundamental que indica a resistência de um material à penetração de um outro material mais duro. A medida da dureza é importante para avaliar a resistência ao desgaste, à abrasão e à indentação. A microdureza Vickers é um ensaio amplamente utilizado para a determinação da dureza de materiais metálicos e compósitos, fornecendo informações sobre a distribuição da dureza ao longo da microestrutura (GUPTA et al., 2016).

Neste trabalho, investigou-se a influência dos tratamentos térmicos na dureza de um compósito de matriz metálica à base de liga de alumínio AA7075 reforçado com 10% em volume de partículas de carbetto de titânio (TiC). O compósito foi produzido por meio da técnica de metalurgia do pó e submetido a tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento. A microestrutura do material foi caracterizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia

de dispersão de energia (EDS) para avaliar a distribuição das partículas de reforço e a formação de precipitados. A dureza do material foi determinada por meio de ensaios de microdureza Vickers.

Os resultados obtidos neste estudo permitiram avaliar a eficácia dos tratamentos térmicos na melhoria da dureza do compósito de alumínio AA7075/TiC. A comparação entre as amostras tratadas termicamente e as amostras não tratadas permitiu identificar a influência dos precipitados intermetálicos na resistência à deformação plástica do material. Além disso, a análise da distribuição da dureza ao longo da microestrutura forneceu informações importantes sobre a homogeneidade do material e a influência das partículas de reforço na dureza local.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência dos tratamentos térmicos na dureza de um compósito de matriz metálica à base de liga de alumínio AA7075 reforçado com partículas de carvão de titânio (TiC). Especificamente, buscou-se compreender como os processos de solubilização e envelhecimento afetam a microestrutura e as propriedades mecânicas do material, com foco na dureza. Através da caracterização microestrutural e dos ensaios de microdureza Vickers, objetivou-se quantificar o aumento da dureza e correlacionar esse aumento com a formação de precipitados intermetálicos na matriz de alumínio. Os resultados obtidos neste estudo contribuem para o desenvolvimento de novos materiais com propriedades mecânicas otimizadas para aplicações em setores que demandam alta resistência e durabilidade.

1.2 Justificativas

Os resultados deste trabalho contribuem para o avanço do conhecimento sobre os compósitos de matriz metálica à base de ligas de alumínio reforçados com partículas cerâmicas. As informações obtidas podem ser utilizadas para otimizar o processo de fabricação e os tratamentos térmicos desses materiais, visando o desenvolvimento de novos materiais com propriedades mecânicas superiores para aplicações em diversos setores 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 produzidos a partir de pós elementares dos elementos constituintes, submetidos a moagem em alta energia em um moinho vibratório SPEX por diferentes períodos (30, 60 e 120 minutos) para promover a homogeneização da mistura e redução do tamanho das

partículas. Após a moagem, os pós foram compactados e sinterizados a fim de obter peças sólidas com maior resistência mecânica. A partir desta etapa, o foco da pesquisa se voltou para a aplicação de tratamentos térmicos e a subsequente avaliação das propriedades mecânicas e microestruturais dos compósitos, visando compreender a influência desses tratamentos na melhoria das características do material.

2.2 Tratamentos térmicos

Neste trabalho, foram realizados tratamentos térmicos de solubilização (480°C/90 min) e envelhecimento (120°C/3 h) em compósitos de matriz de alumínio, com o objetivo de induzir o endurecimento por precipitação. Os tratamentos foram realizados em forno mufla no laboratório de metalurgia do pó do INTM-UFPE, seguindo os procedimentos padrões para essas ligas. A solubilização promove a dissolução de elementos de liga na matriz, enquanto o envelhecimento favorece a formação de precipitados que dificultam o movimento das discordâncias, aumentando assim a dureza do material.

2.3 Preparação e Caracterização das amostras

Após a realização dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento, as amostras de liga de alumínio foram submetidas a uma série de procedimentos de preparação metalográfica com o objetivo de revelar sua microestrutura e permitir a realização de análises microestruturais e de microdureza.

Inicialmente, as amostras foram encapsuladas em resina epóxi para garantir maior rigidez e facilitar o manuseio durante as etapas subsequentes de preparação. A resina epóxi, composta por resina em pó e catalisador, proporcionou um suporte sólido para as amostras, permitindo cortes precisos e evitando danos durante o polimento.

Após o embutimento, as amostras foram submetidas a um processo de lixamento mecânico, utilizando lixas abrasivas de granulometria crescente (de 240 a 1200). Essa etapa teve como objetivo remover imperfeições superficiais e gerar uma superfície plana e uniforme. Em seguida, as amostras foram polidas mecanicamente utilizando panos de polimento e pasta de diamante, resultando em um acabamento espelhado e livre de riscos, essencial para a obtenção de imagens de alta qualidade em microscopia.

A microdureza Vickers foi utilizada para avaliar a resistência à penetração das amostras. Um microdurômetro aplicou uma carga de 0,1kgf em diferentes pontos da superfície das amostras, permitindo a determinação da dureza Vickers. Essa técnica fornece informações importantes sobre o endurecimento da liga após os tratamentos térmicos.

3. RESULTADOS

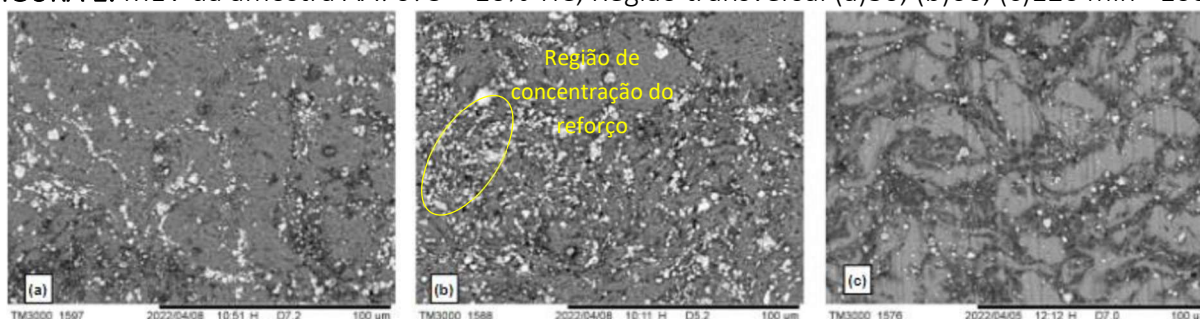
Os resultados das caracterizações e avaliação do comportamento mecânico das amostras obtidos através dos ensaios realizados serão abordados nessa seção.

3.1 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva

A análise microestrutural revelou uma evolução significativa com o aumento do tempo de moagem. Observou-se uma diminuição no tamanho das lamelas, característica marcante da microestrutura em camadas formada durante o processo de compactação. Essa redução no tamanho das lamelas está diretamente relacionada com o aumento do empilhamento das barreiras, o que, por sua vez, contribui para o aumento da dureza do material, como evidenciado pelos ensaios de microdureza.

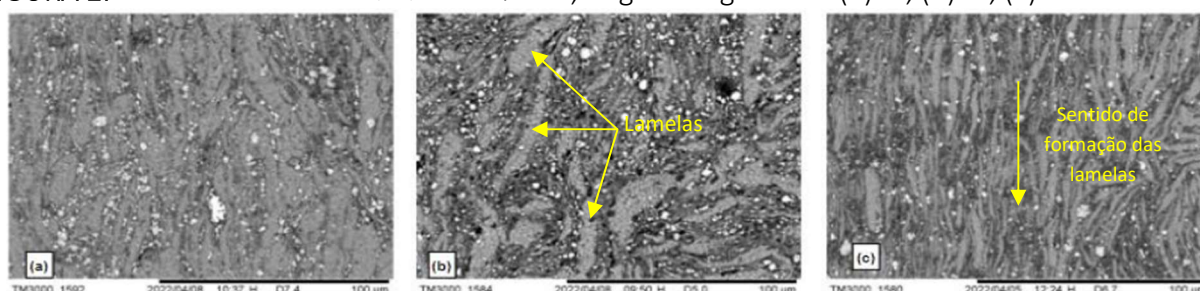
As micrografias obtidas por MEV permitiram uma visualização detalhada da distribuição das lamelas na matriz e da morfologia resultante dos processos de fratura e soldagem durante a moagem. A incorporação do reforço particulado na matriz se mostrou mais eficiente com o aumento do tempo de moagem, indicando uma melhor dispersão e interação entre as fases constituintes do compósito, conforme apresentado pela Figura 1 e Figura 2.

FIGURA 1. MEV da amostra AA7075 + 10% TiC, Região transversal (a)30, (b)60, (c)120 min –1000x



Fonte: Autor (2022).

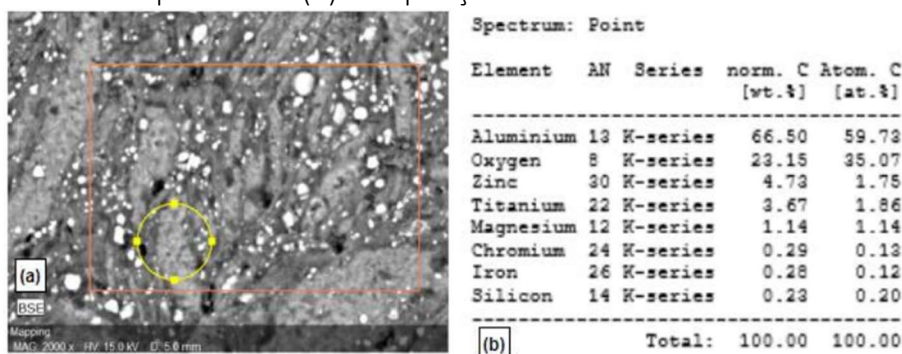
FIGURA 2. MEV da amostra AA7075 + 10% TiC, Região longitudinal (a)30, (b)60, (c)120 min –1000x



Fonte: Autor (2022).

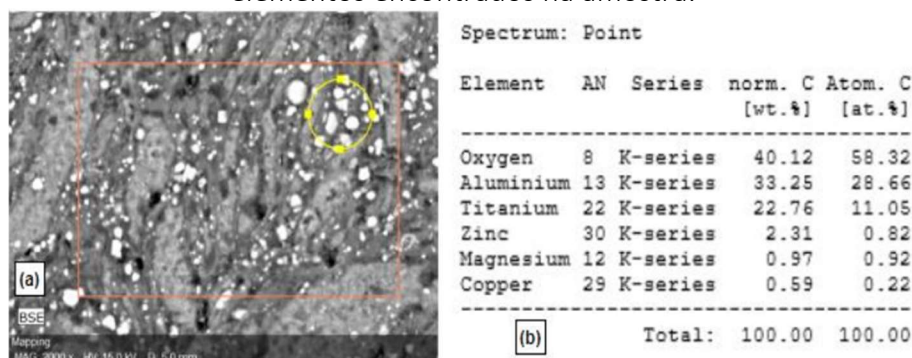
A análise por EDS das amostras com 10% de carбето de titânio e 60 minutos de moagem revelou informações relevantes sobre a composição química e a microestrutura do material. A Figura 3 evidencia a alta concentração de alumínio na matriz do compósito, confirmando a natureza predominantemente aluminosa desta região. Por outro lado, a Figura 4 destaca uma região com uma composição química distinta, caracterizada por uma maior concentração de titânio e dos elementos constituintes dos precipitados endurecedores. Essa heterogeneidade na composição química reflete a presença do reforço de carбето de titânio e dos precipitados intermetálicos formados durante o tratamento térmico, os quais desempenham um papel crucial no endurecimento do material.

FIGURA 3. - EDS da região transversal da amostra AA7075 + 10% TiC com 60 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 + 10% TiC com 60 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.

O tempo de moagem exerceu uma influência significativa na microdureza das amostras. Em geral, observa-se um aumento na microdureza com o aumento do tempo de moagem, tanto na direção transversal quanto na longitudinal. Isso sugere que o processo de moagem promoveu um endurecimento do material.

A microdureza apresentou valores diferentes nas direções transversal e longitudinal para a maioria das amostras. Essa anisotropia indica que as propriedades mecânicas do material variam de acordo com a direção de medição, o que pode estar relacionado à orientação dos grãos ou à presença de defeitos cristalinos.

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

Tempo de moagem	Área	Sem Tratamento (HV)	Com Tratamento (HV)	Desvio Padrão
30min	Transversal	95	225,63	28,62
	Longitudinal	96	139,13	27,08
60min	Transversal	105	230,12	34,72
	Longitudinal	105	199,5	16,3
120min	Transversal	122	137,86	19,65
	Longitudinal	140	215,75	27,15

Fonte: Autor (2022).

Os resultados obtidos evidenciaram que o tratamento térmico aplicado às amostras promoveu um considerável aumento na dureza, conforme demonstrado pelos ensaios de microdureza Vickers. Essa melhoria nas propriedades mecânicas pode ser atribuída à formação de precipitados intermetálicos, que atuam como obstáculos ao movimento de discordâncias, dificultando a deformação plástica do material. Além disso, o refino da microestrutura, decorrente do tratamento térmico, também contribuiu para o aumento da resistência mecânica.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo revelaram que o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial aplicado ao compósito de matriz metálica AA7075 reforçado com 10% de carbeto de titânio (TiC) resultou em melhorias significativas nas propriedades mecânicas do material, especialmente na dureza. A formação de precipitados intermetálicos desempenhou um papel crucial ao atuar como barreiras ao movimento de discordâncias, aumentando, assim, a resistência à deformação plástica.

Além disso, a análise microestrutural mostrou que o refino da microestrutura decorrente do tratamento térmico contribuiu para a homogeneidade do material e, conseqüentemente, para o

aumento de sua resistência. Os ensaios de microdureza Vickers evidenciaram que o tempo de moagem foi um fator determinante para a dureza do compósito, com um aumento progressivo observado conforme o tempo de moagem foi ampliado. Este efeito é atribuído à melhor distribuição e interação das partículas de TiC na matriz de alumínio, promovendo uma maior dispersão e uma microestrutura mais refinada.

Portanto, o estudo demonstrou que a aplicação de tratamentos térmicos é uma estratégia eficaz para otimizar as propriedades mecânicas de compósitos de matriz metálica à base de AA7075, o que pode ter implicações práticas significativas para o desenvolvimento de materiais avançados para aplicações industriais que exigem alta resistência e durabilidade.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

GUPTA, M., WONG, W. L. Enhancing Overall Mechanical Performance of Metallic Materials Using Two-Dimensional (2D) Nanoreinforcements: An Overview. *Composites Part B: Engineering*, v. 86, p. 47-61, 2016.

KIM, J. K., KIM, Y. H., KIM, W. J. Mechanical Properties of Powder Extruded 7075 Aluminum Alloy Composites Reinforced with Carbon Nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*, v. 640, p. 16-21, 2015.

LIU, T., WANG, Y., ZHANG, L. Influence of Nano-TiC on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Matrix Composites. *Materials Science and Engineering A*, v. 761, p. 138050, 2019.

SRIVASTAVA, A. K., SINGH, K. K., PRASAD, S. K. Effect of Solution Treatment and Ageing on the Hardness and Tensile Properties of Aluminum Based Hybrid Metal Matrix Composites. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 11, p. 1457-1468, 2021.

THOMAS, S., BALACHANDRAN, G., SHIVAKUMAR, S. Comparative Study on the Mechanical and Tribological Properties of 7075 Aluminum Alloy Reinforced with TiC and SiC Nanoparticles Synthesized via Powder Metallurgy. *Materials Today: Proceedings*, v. 33, p. 2118-2122, 2020.

ZHANG, X., LI, D., ZHOU, H. Microstructure and Wear Behavior of TiC Particles Reinforced Al7075 Alloy Composite Fabricated by Powder Metallurgy. *Materials Research Express*, v. 4, n. 3, p. 035009, 2017.

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.