INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA,
INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)

ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANÁLISE DO DESGASTE EM AA6061 E COMPÓSITOS REFORÇADOS COM DIFERENTES TEORES DE SiC

JULIANA SOMBRIO

Foz do Iguaçu

2025

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)

ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANÁLISE DO DESGASTE EM AA6061 E COMPÓSITOS REFORÇADOS COM DIFERENTES TEORES DE SiC

JULIANA SOMBRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Ferreira da Silva Junior

Foz do Iguaçu

2025

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

JULIANA SOMBRIO

ANÁLISE DO DESGASTE EM AA6061 E COMPÓSITOS REFORÇADOS COM DIFERENTES TEORES DE SiC

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

_____

Orientador: Prof. Dr. José Ferreira da Silva Junior
UNILA

_____

Profa. Dra. Gislaine Bezerra Pinto Ferreira
UNILA

_____

Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu
UNILA

Foz do Iguaçu, 05 de agosto de 2025.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me conceder sabedoria, serenidade e firmeza ao longo de toda essa caminhada.

À minha família, com especial carinho aos meus pais, Fabio e Michela, e à minha irmã, Cecília, agradeço pelo amor inabalável, pelo suporte nos momentos difíceis e por sempre acreditarem no meu potencial. Cada gesto de incentivo foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Ao meu marido, Felipe, sou imensamente grata pela paciência, apoio e compreensão. Sua presença constante, mesmo nos dias mais exaustivos, foi essencial para que eu seguisse firme e confiante rumo à conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Ferreira da Silva Junior, agradeço pela orientação, apoio e disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua contribuição foi essencial para a realização deste estudo.

Estendo meu agradecimento aos professores que me acompanharam ao longo da graduação pelos ensinamentos transmitidos. Suas aulas e orientações foram essenciais para a construção do conhecimento que levo comigo.

Aos colegas de curso, deixo meu agradecimento pela parceria, troca de experiências e companheirismo durante essa jornada. As vivências compartilhadas tornaram esse percurso mais leve e enriquecedor.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

RESUMO

O avanço tecnológico tem impulsionado a busca por materiais com maior resistência mecânica, leveza e durabilidade, especialmente em setores como a indústria automotiva, aeronáutica e de manufatura. Nesse cenário, os compósitos de matriz metálica, vem se destacando por apresentarem melhorias significativas nas propriedades mecânicas e tribológicas. A liga AA6061, amplamente utilizada na indústria, possui boa resistência mecânica e leveza, porém apresenta limitações quanto a resistência ao desgaste. A adição de reforços cerâmicos como carbeto de silício (SiC) é uma estratégia promissora para superar essas limitações. Neste trabalho, investigou-se o comportamento ao desgaste da liga de alumínio AA6061 e de compósitos reforçados com 5% e 15% de SiC em massa, produzidos por fundição com agitação manual. As amostras foram caracterizadas macro e micro estruturalmente e realizou-se ensaios de desgaste do tipo pino-sobre-disco, com parâmetros baseados na norma ASTM G99. Os testes foram conduzidos a uma velocidade de 0,8 m/s, com carga de 7,2 N e distância percorrida de 2400 metros. Os resultados indicam que a presença do SiC promoveu um melhor desempenho no aspecto tribológico, apresentando perda de massa mínima e predominância do desgaste abrasivo. A análise da superfície desgastada sugere que houve uma contribuição do SiC no aumento de resistência ao desgaste, apresentando sulcos menos profundos e aparentemente menor deformação plástica na amostra com maior teor de reforço.

Palavras-chave: Liga AA6061; carbeto de silício; compósito; tribologia.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

RESUMEN

El avance tecnológico ha impulsado la búsqueda de materiales con mayor resistencia mecánica, ligereza y durabilidad, especialmente en sectores como la industria automotriz, aeronáutica y de manufactura. En este contexto, los compuestos de matriz metálica se han destacado por sus mejoras significativas en las propiedades mecánicas y tribológicas. La aleación AA6061, ampliamente utilizada en la industria, posee buena resistencia mecánica y bajo peso, pero presenta limitaciones en cuanto a la resistencia al desgaste. La adición de refuerzos cerámicos como el carburo de silicio (SiC) es una estrategia prometedora para superar estas limitaciones. En este trabajo se investigó el comportamiento frente al desgaste de la aleación de aluminio AA6061 y de compuestos reforzados con 5% y 15% de SiC en masa, producidos mediante fundición con agitación manual. Las muestras fueron caracterizadas macro y microestructuralmente y se realizaron ensayos de desgaste tipo pin-on-disk, con parámetros basados en la norma ASTM G99. Las pruebas se realizaron a una velocidad de 0,8 m/s, con una carga de 7,2 N y una distancia recorrida de 2400 metros. Los resultados indicaron que la presencia de SiC promovió un mejor desempeño tribológico, presentando una pérdida mínima de masa y predominancia de desgaste abrasivo. El análisis de la superficie desgastada sugiere que el SiC contribuyó al aumento de la resistencia al desgaste, con surcos menos profundos y aparentemente menor deformación plástica en la muestra con mayor contenido de refuerzo.

Palabras clave: Aleación AA6061; carburo de silicio; compuesto; tribología.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

ABSTRACT

Technological advancement has driven the search for materials with greater mechanical strength, lightness, and durability, especially in sectors such as the automotive, aerospace, and manufacturing industries. In this context, metal matrix composites have stood out for their significant improvements in mechanical and tribological properties. The AA6061 alloy, widely used in industry, offers good mechanical strength and lightness, but it presents limitations regarding wear resistance. The addition of ceramic reinforcements such as silicon carbide (SiC) is a promising strategy to overcome these limitations. This study investigated the wear behavior of the AA6061 aluminum alloy and composites reinforced with 5% and 15% SiC by weight, produced by casting with manual stirring. The samples were macro- and microstructurally characterized and subjected to pin-on-disk wear tests, following parameters based on ASTM G99. The tests were conducted at a speed of 0.8 m/s, with a load of 7.2 N and a sliding distance of 2400 meters. The results indicated that the presence of SiC promoted better tribological performance, showing minimal mass loss and predominance of abrasive wear. The worn surface analysis suggests that the SiC contributed to increased wear resistance, with shallower grooves and apparently less plastic deformation in the sample with a higher reinforcement content.

Keywords: AA6061 alloy; silicon carbide; composite; tribology.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-MEV do AA6061 – 15% SiC na ampliação (a) 100x; (b) 400x; (c) 750x; (d) 1000x 10
Figura 2 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de espécime composto de matriz de alumínio reforçado com SiC (15% em peso) submetido a ensaio de tração 11
Figura 3 - Imagens de MEV (a) AA6351/4%SiC (b) AA6351/8%SiC (c) AA6351/12%SiC 12
Figura 4 - Usos do AA6061 (a) pinça de freio; (b) coroa de bicicleta; (c) eixo de transmissão; (d) hélice de propulsão subaquática. 13
Figura 5 - Processo de fundição 14
Figura 6 - Mecanismos de desgaste abrasivo: a) Por corte b) Fratura c) Fadiga d) Retirada de grão 16
Figura 7 - Processo de transferência de metal por adesão. 16
Figura 8- Esquema do sistema de teste de desgaste pino-disco. 17
Figura 9 - Superfície desgastada (a) AA6061 (b) SiC/Al 18
Figura 10 - Fotografia de MEV das superfícies desgastadas (a) 5% SiC aumentado 100x (b) 15% SiC aumentado 100x 19
Figura 11 - Trilha de desgaste (a) AA6061 (b) AA6061/5%SiC 20
Figura 12 - Esquema da sequência do trabalho 21
Figura 13 - Caixaria para manipulação durante o processo de fundição 22
Figura 14 – Cilindro usado para fabricar o molde 22
Figura 15 –Moldes para o vazamento do fundido (Vertical) 22
Figura 16 - Esquema do metal fundido sendo vertido no molde. 24
Figura 17 - Liga AA6061 solidificando no molde após ser vertido. 24
Figura 18 - Amostra de AA6061 para fundição e pó de SiC preparado com fina camada de papel alumínio 25
Figura 19 - Etapa do processo de agitação para homogeneização do compósito 26
Figura 20 - Aspecto final do fundido de AA6061 com reforço de SiC. 26
Figura 21 - Liga AA6061 com reforço de SiC solidificando no molde após ser vertido. 27
Figura 22 - Equipamento desenvolvido por Luzia. 29
Figura 23 - Esquema do tribômetro. 30

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Figura 24 - Adaptação realizada na máquina de ensaio para adicionar carga variável 31
Figura 25 - Resíduo de pó de SiC e alumínio no cadinho após fundição: (a) Sobra AA6061 5% SiC (b) Sobra AA6061 15% SiC 33
Figura 26 - Macroestrutura das amostras após fundição e desmolde (a) vista superior da amostra (b) vista lateral da amostra 34
Figura 27 - EDS do pó de SiC 36
Figura 28 – Imagem de MEV do pó de SiC aumentado em 1000x. 36
Figura 29 - MEV (a) AA6061 aumentado em 500x (b) Contraste (c) AA6061 5% SiC aumentado em 500x (d) Contraste (e) AA6061 15% SiC aumentado em 500x (f) Contraste 37
Figura 30 - Realização do ensaio de desgaste em cada amostra (a) ensaio AA6061 (b) ensaio AA6061 5% SiC (c) ensaio AA6061 15% SiC 40
Figura 31 - Macroestrutura das amostras após o ensaio de desgaste (a) AA6061, (b) AA6061 5%, (c) AA6061 15% SiC 41
Figura 32 - MEV da superfície das amostras depois do ensaio de desgaste (a) AA6061 250x, (b) AA6061 5% SiC 250x, (c) AA6061 15% SiC 250x 44

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do alumínio metálico 4
Tabela 2 - Classificação das ligas forjadas e fundidas. 5
Tabela 3 – Limites teóricos da composição química da liga AA6061. 6
Tabela 4 - Propriedades mecânicas típicas das ligas de alumínio. 6
Tabela 5 - Propriedades do SiC. 7
Tabela 6 - Mecanismos de desgaste. 15
Tabela 7 - Ajuste de RPM para m/s 32
Tabela 8 - Perda de massa pela distância percorrida com diferentes teores de reforço no ensaio de desgaste 41
Tabela 9 - Taxa de desgaste pela distância percorrida com diferentes teores de reforço no ensaio de desgaste 43

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Velocidade em RPM pela potência do equipamento 31
Gráfico 2 - Variação mássica pela distância percorrida com diferentes teores de reforço no ensaio de desgaste. 42
Gráfico 3 - Taxa de desgaste pela distância final. 43

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

1.1 OBJETIVO GERAL 2

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2

1.3 JUSTIFICATIVA 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1 ALUMÍNIO 4

2.1.1 Alumínio e suas ligas 5

2.1.2 Liga 6061 6

2.2 CARBETO DE SILÍCIO 7

2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA 8

2.3.1 Compósito Al–SiC 9

2.3.2 Aplicações 13

2.4 FUNDIÇÃO POR AGITAÇÃO 14

2.5 DESGASTE 15

2.5.1 Ensaio de desgaste pino sobre disco 17

3. MATERIAIS E MÉTODOS 21

3.1 MATERIAIS 21

3.2 PREPARO DOS MATERIAIS 22

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 23

3.3.1 Macroestrutura 27

3.3.2. Metalografia 28

3.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 28

3.3.4 Ensaio de desgaste 28

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 33

4.1 FUNDIÇÃO 33

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

4.2 MACROESTRUTURA 34
4.3 MICROESTRUTURA.....35
4.4 ENSAIO DE DESGASTE 40
5. CONCLUSÃO 47
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 47
REFERÊNCIAS.....48

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos combinam diferentes materiais a fim de gerar um novo com propriedades diferentes e mais adequadas ao projeto do que a de seus materiais de origem. No contexto de materiais de reforço para as ligas de alumínio, destacam-se cerâmicas como óxido de alumínio, carbeto de silício e nitretos, que conferem ao material propriedades mecânicas superiores. A fabricação desses compósitos é usualmente realizada por métodos de metalurgia do pó ou dispersão de reforços em metal líquido.

O alumínio é um elemento metálico abundante na crosta terrestre, encontrado geralmente na forma de óxido e raramente como metal puro. Seu uso industrial teve início nas primeiras décadas do século XIX quando o isolamento do metal se tornou viável (BARBOSA, 2014). Destaca-se suas propriedades quanto a leveza, boa condutividade elétrica, resistência à corrosão e ductilidade, que o tornaram um material versátil em diversas aplicações. Porém, o alumínio puro, apresenta valores relativamente baixos de resistência a tração e desgaste. Essa característica incita o desenvolvimento de ligas de alumínio e a união com diferentes materiais para formar compósitos.

O carbeto de silício, comumente empregado como reforço, é considerado o mais importante entre os carbetos. Possui alto potencial como cerâmico avançado com excelentes propriedades mecânicas a baixa e alta temperatura, resistência ao desgaste, propriedade térmicas e resistência a corrosão (HOZER et al., 1995).

Após o desenvolvimento do compósito, pode-se estudar as novas propriedades adquiridas pelo material. Dentre as análises mecânicas possíveis, tem-se a tribologia. A tribologia estuda a interação entre superfícies em movimento e é fundamental para entender fenômenos como atrito, desgaste e lubrificação (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). Considerada uma área importante da ciência dos materiais por não apenas minimizar perdas de material, mas também evitar falhar catastróficas que podem gerar prejuízos na indústria.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

1.1 OBJETIVO GERAL

Produzir compósito de alumínio e carbeto de silício, em diferentes porcentagens da cerâmica, e analisar seu comportamento quanto ao desgaste.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Dentre os objetivos específicos, podemos citar os seguintes:

1. Produzir materiais compósitos de alumínio reforçado com carbeto de silício através da fundição;
2. Estudar a influência da adição do SiC no alumínio na resistência ao desgaste;
3. Analisar a morfologia da superfície do material produzido afim de entender os mecanismos de desgaste.

1.3 JUSTIFICATIVA

Com avanço tecnológico na sociedade, tornou-se necessário desenvolver novos tipos de materiais para atender à demanda do mercado, fornecendo produtos com melhores propriedades, maior leveza e menor custo. Materiais compósitos são materiais fabricados ou encontrados na natureza que contêm dois ou mais constituintes distintos, cujas propriedades químicas, físicas e mecânicas são significativamente diferentes (MOGHADAM et al. 2015). Quando projetado adequadamente, o novo material possui melhor resistência do que teriam cada um dos materiais constituintes. De modo geral, os compósitos apresentam elevada resistência mecânica e rigidez, sendo materiais leves, com alta resistência à corrosão, boa tenacidade e uma elevada relação entre resistência mecânica e massa (SINGH et al., 2013).

A liga AA6061 é formada por Mg e Si, e possuem excelentes propriedades que incluem resistência média, excelente resistência à corrosão, boa soldabilidade e efeito de oxidação. Isso é amplamente utilizado em diferentes produtos automotivos que precisam de alguma resistência e forte resistência à corrosão, como caminhões, torres de edifícios, embarcações, bondes, ferrovias (BENEDYK, 2010). Ao utilizar a liga AA6061 como matriz e o carbeto de silício (SiC) como reforço, obtém-

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

se um compósito que potencializa as propriedades dos materiais geradores. Esse compósito é uma escolha típica para aplicações nas indústrias de aviação, defesa, estrutural e manufatura, devido às suas excepcionais propriedades mecânicas e tribológicas (WANG et AL., 2011).

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ALUMÍNIO

O alumínio é o segundo elemento mais abundante no planeta, é encontrado na natureza na forma de bauxita (que contém cerca de 60% (Al2O3), o principal minério de Al foi descoberto em 1821 pelo geólogo Pierre Berthier na aldeia Les Baux-de-Provence, localizada no sul da França. Foi isolado na forma metálica pela primeira vez em 1827 pelos cientistas Friedrich Wöhler e Hans Christian Orsted (ARAUJO et al., 2021).

Araujo continua que, com o advento da revolução industrial, no início do século XIX, e a busca por materiais com boas propriedades químicas e físicas, foram desenvolvidos processos industriais para produção de Al metálico em larga escala, entre eles destacam os processos Hall-Héroult, desenvolvidos pelos engenheiros, Paul Héroult e Charles Martin Hall em 1886, e o processo Bayer desenvolvido pelo químico Carl Joseph Bayer em 1989. Sendo utilizados até hoje para a produção de alumínio metálico.

O alumínio apresenta excelentes propriedades e tornam-se econômicos e atraentes para uma ampla variedade de usos, como baixa densidade, ductilidade, boa condutividade térmica e elétrica, resistência a corrosão (KUMAR e KUMARASWAMIDHAS, 2018). A Tabela 1 indica as propriedades do alumínio segundo a American Society for Metals – ASM (1992).

Tabela 1 - Propriedades do alumínio metálico

Propriedades	**Valor**
Ponto de fusão (ºC)	660
Densidade (g/cm^3)	2,70
Ponto de ebulição (ºC)	2,470
Calor específico (cal/g.ºC)	0,219
Condutividade térmica (W/m.K)	23,5
Resistividade elétrica à 20ºC (Ω.cm)	2,69
Módulo de elasticidade (GPa)	68,3

Fonte: ASM 1992.

O alumínio em seu estado puro apresenta uma baixa resistência mecânica, o que compromete a sua aplicabilidade. Desse modo, o alumínio precisa combinar-se com elementos de liga que conferem ao alumínio uma extrema

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

versatilidade (DIAS, 2016). Os principais elementos de ligas incluem cobre (Cu), magnésio (Mg), silício (Si), manganês (Mn) e zinco (Zn) (DINIZ, 2018).

2.1.1 Alumínio e suas ligas

O alumínio pode se combinar com a maioria dos metais de engenharia e formar ligas metálicas, obtendo características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto (ABAL, 2007). As diferentes composições químicas apresentarão diferentes características para cada liga.

As ligas de alumínio são regularmente especificadas segundo a Associação de Alumínio (AA), em função da sua composição química. (HERNANDEZ; RAMÍREZ; MACKAY, 2017). Em geral, são classificadas como fundidas ou forjadas, sendo as composições denominadas da seguinte forma: um número com quatro dígitos, indicando os principais elementos de liga e em alguns casos o nível de pureza para as ligas fundidas e, quatro dígitos com uma vírgula decimal entre os dois últimos dígitos existentes para as ligas forjadas. Após esse dígito existe um hífen e uma letra e um número que indica o tratamento mecânico e/ou térmico ao qual a liga foi submetida (CALLISTER,2012). Essa classificação pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das ligas forjadas e fundidas.

Designação de Ligas Forjadas		**Designação de Ligas Fundidas**	
Série da Liga	Elementos Majoritários na Liga	Série da Liga	Elementos Majoritários na Liga
1xxx	Mais de 99% de Alumínio	1xx.x	Mais de 99% de Alumínio
2xxx	Cobre	2xx.x	Cobre
3xxx	Manganês	3xx.x	Silício e Cobre e/ou Magnésio
4xxx	Silício	4xx.x	Silício
5xxx	Magnésio	5xx.x	Magnésio
6xxx	Magnésio e Silício	6xx.x	Série não Utilizada
7xxx	Zinco	7xx.x	Zinco
8xxx	Outros Elementos	8xx.x	Estanho
9xxx	Série não Utilizada	9xx.x	Outros Elementos

Fonte: HANDBOOK OF ALUMINIUM, 2003.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Quanto as características de cada liga, conforme classificação da ABNT, 2000, as ligas 2XXX apresentam elevada resistência mecânica, alta ductilidade, média resistência à corrosão e boa usinabilidade; ligas 6XXX tem elevada resistência mecânica quando tratáveis termicamente; e, as ligas 7XXX uma alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão e boa conformidade. Em particular, se destacam por serem as mais estudadas as ligas da série AA6061 e AA7075 (ZHANG et al, 2023) e a liga AA2219 que é amplamente utilizada em diversas aplicações (SARAVANAKUMAR et al, 2018).

2.1.2 Liga 6061

As ligas que compõem a série 6XXX utilizam Mg e Si, na forma do composto intermetálico Mg_2Si (siliceto de magnésio), de modo a garantir uma resposta ao tratamento de solubilização e ao tratamento de precipitação (ASM, 1990).

As ligas AA6061 são normalmente usadas em perfis extrudados usados na arquitetura, e em aplicações estruturais (como quadros de bicicletas), equipamentos de transporte, trilhos de pontes, estruturas soldadas e indústria automobilística (BARBOSA, 2014; ASM, 1992).

A Tabela 3 mostra os limites teóricos da composição química da liga AA6061 e a Tabela X as propriedades mecânicas típicas das ligas de alumínio.

Tabela 3 – Limites teóricos da composição química da liga AA6061.

Liga	Composição (%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA 6061	0,4- 0,8	0,2	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	96,54

Fonte: ABAL, 2004.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas típicas das ligas de alumínio.

Liga e Têmpera	Limite de resistência à Tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Dureza HB	Limite de resistência ao cisalhamento	Resistência à fadiga (MPa)	Modulo de elasticidade (GPa)
6061-T6	310	275	95	205	95	69
6063-T6	240	215	73	150	70	69
6351-T6	310	285	95	200	90	69

Fonte: ASM (1991).

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

2.2 CARBETO DE SILÍCIO

Os materiais cerâmicos são compostos pela combinação de elementos metálicos e não metálicos da tabela periódica. O silício e o carbono possuem uma forte ligação covalente que formam o carbeto de silício (SiC). Ele é uma das cerâmicas estruturais mais utilizadas com excelentes propriedades, como boa resistência mecânica e elevado módulo de elasticidade em função da temperatura, alta resistência ao desgaste, baixa densidade e coeficiente de atrito, resistência à corrosão e à erosão, extremamente duro, resistência ao choque térmico e má usinabilidade (VANGER, 2011). A Tabela 5 mostra algumas propriedades do SiC.

Tabela 5 - Propriedades do SiC.

Propriedades SiC	
Densidade (g/cm³)	3,21
Módulo de Elasticidade (GPa)	455
Resistência à tração (MPa)	171
Resistência à compressão (MPa)	1050
Tensão de escoamento (MPa)	140
Tenacidade (MPa.m^0,5)	2,5 a 4,0

Fonte: GODOY, 2005.

O carbeto de silício é um material cerâmico, constituído por carbono e silício, comumente utilizado como reforço em matrizes metálicas devido a sua alta dureza, condutividade térmica, estabilidade química e propriedades semicondutoras. Foi descoberto como consequência aos estudos direcionados para a síntese do diamante, no ano de 1890 (SILVA et al., 2014). As características do carbeto de silício são decorrentes das ligações covalentes entre os átomos das moléculas de SiC (SANTANA, 2010).

Ao longo dos anos foram desenvolvidos vários métodos para a síntese do SiC, entre eles os mais conhecidos são: deposição química a vapor, crescimento confinado de nanotubos a base de carbono, redução carbotérmica, ablação a laser, crescimento químico a vapor, evaporação térmica e moagem de alta energia (CHIEW e CHEONG, 2021).

Comercialmente o pó de carbeto de silício tem sido obtido através de uma redução carbotérmica da sílica, processo denominado de processo Acheson. Este método é usado em escala industrial porque conta com fontes de baixa pureza

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

de sílica e carbono como reagentes, elementos de fácil aquisição e baixo preço. Sendo também eficiente quanto a energia necessária para a obtenção (BRAGA, 2011).

O processo Acheson consiste em misturar em um forno sílica e uma fonte de carbono, que em geral é carvão ou coque de petróleo. Esta mistura é aquecida fazendo-se passar uma corrente elétrica entre grandes eletrodos posicionados em extremidades opostas do forno.

A reação pode ser dividida em duas etapas (SILVA, 2009).

$$SiO_2\,(s) + C\,(s) \rightarrow SiO\,(g) + CO\,(g) \quad (1)$$

$$SiO\,(g) + 2C\,(s) \rightarrow SiC\,(s) + CO\,(g) \quad (2)$$

Resultando na reação global:

$$SiO_2\,(s) + 3C\,(s) \rightarrow SiC\,(s) + 2CO\,(g) \quad (3)$$

Silva (2009), ainda destaca que, apesar da variedade de rotas para a síntese do carbeto de silício, o processo Acheson ainda é o mais utilizado, produzindo-se a fase alfa do carbeto de silício em temperaturas mais altas (2000 – 2600ºC) ou a fase beta do carbeto de silício em menores temperaturas (1500 – 2000ºC).

2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA

Os materiais compósitos são usualmente constituídos por duas fases: uma denominada matriz contínua, que envolve a outra fase, denominada de fase dispersa ou reforço (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

Deste modo, um compósito é um material multifásico feito de maneira artificial e que combina as propriedades de dois ou mais materiais a fim de obter um material resultante com propriedades diferentes dos materiais de origem (JIA et al., 2018).

De forma geral, compósitos são primordiais para o desenvolvimento e melhoria de materiais. Quanto aos tipos de compósitos, destaca-se o compósito de matriz metálica (CMM), por exibirem baixa densidade, maior resistência ao desgaste, dissipação mais eficiente de calor e maior módulo de elasticidade. Essas propriedades têm sido uma das principais alternativas para a necessidade do mercado, em produzir

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

materiais mais resistentes e com baixo peso. Estruturas aeronáuticas, aeroespaciais, automotivas, navais e ferroviárias necessitam ser cada vez mais leves e eficientes em termos de economia de combustível, além do elevado desempenho mecânico (OLIVEIRA, 2013).

A fase de reforço dos CMM melhora as propriedades mecânicas da matriz metálica, podendo ser o reforço na forma de fibras (curtas, longas ou contínuas) ou na forma de partículas. O reforço em forma de partícula são as mais empregadas devido as melhores combinações de propriedades (isotropismo) que podem ser conseguidas pela sua incorporação na matriz, mesmo que demande eventuais revestimentos/tratamentos térmicos para melhor compatibilização interfacial (JAMAATI et al., 2014).

Deve-se considerar ainda que a fração volumétrica, tamanho médio e distribuição de partículas do reforço no compósito tem influência no desempenho mecânico final do compósito, sendo que, com esse aumento há uma tendência de melhora de certas propriedades, existindo um valor limite de adição deste reforço na matriz (NETO e PARDINI, 2006).

O aumento excessivo da fração em peso pode deteriorar as propriedades devido ao aumento da porosidade, aglomeração e distribuição não homogênea das partículas em teores mais elevados de reforço (KAREEM et al., 2021).

A formação desta união está diretamente ligada à forma de dispersão dos reforços, a seleção do processo de fabricação apropriado e a escolha de parâmetros adequados (CHAK e CHATTOPADHYAY, 2020).

As técnicas podem ser classificadas de diversas maneiras, porém a mais usual baseia-se no estado físico de produção, dividindo os métodos de fabricação em: estado líquido, sólido e gasoso (SIJO, 2016). Os processos em estado líquido costumam ser os mais utilizados em razão do menor custo e maior facilidade de produção (CHAK e CHATTOPADHYAY, 2020).

2.3.1 Compósito Al–SiC

O alumínio ligado possui propriedades mecânicas e tribológicas inferiores quando comparadas aos seus compósitos. Para melhorar propriedades com

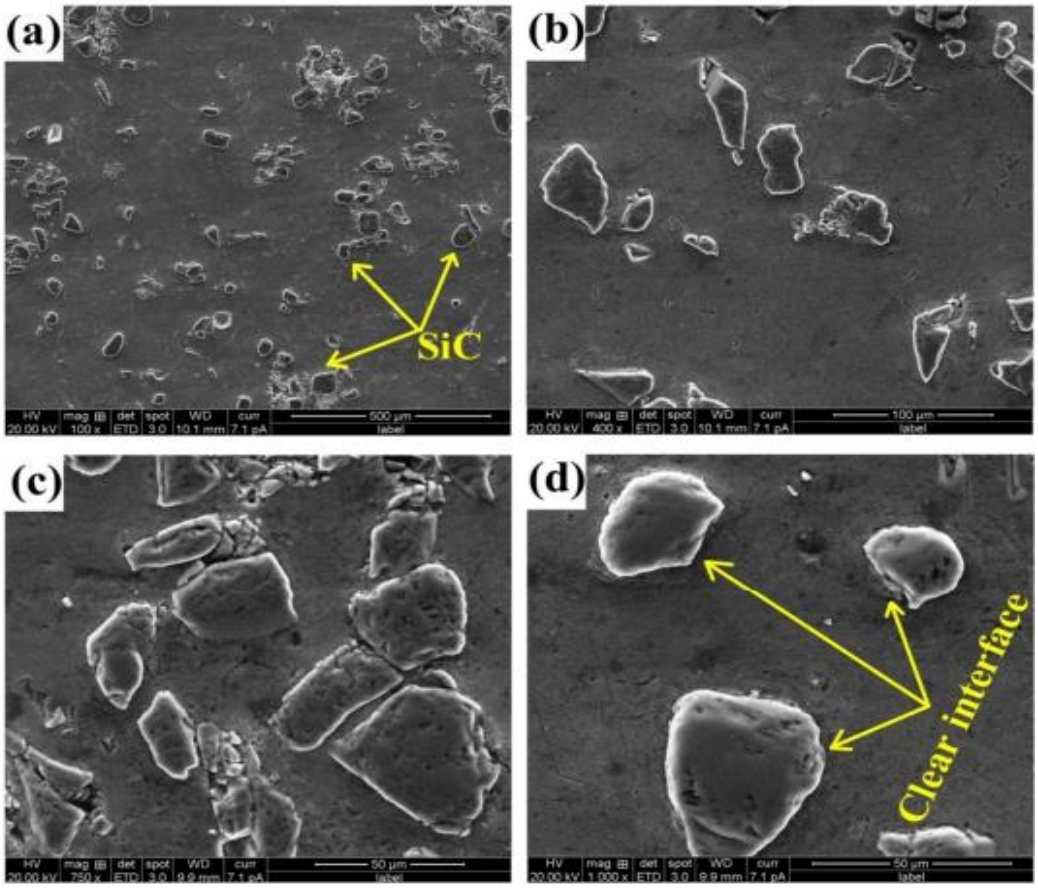
Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

resistência, rigidez, desgaste e resistência à fadiga, partículas de carbeto de silício (SiC) podem ser adicionadas como reforço (KARADEMIR et al, 2017).

Tem-se preferido o uso do carbeto de silício (SiC) nos últimos anos como reforço da matriz de alumínio devido às suas excelentes propriedades, incluindo alta dureza, menor densidade e resistência à corrosão (FATHY et al, 2018).

Jebeen Moses et al. (2014) tentaram fabricar um compósito de AA6061 com partículas de carbeto de silício em frações de peso de 5%, 10% e 15%. Mediante análises microscópicas óptica e de MEV pode-se observar que a distribuição do SiC foi homogênea e levou ao refinamento de grãos. Resultado esse que possivelmente irá proporcionar melhores propriedades mecânicas e tribológicas. A Figura 1 mostra imagens de MEV do compósito.

Figura 1-MEV do AA6061 – 15% SiC na ampliação (a) 100x; (b) 400x; (c) 750x; (d) 1000x



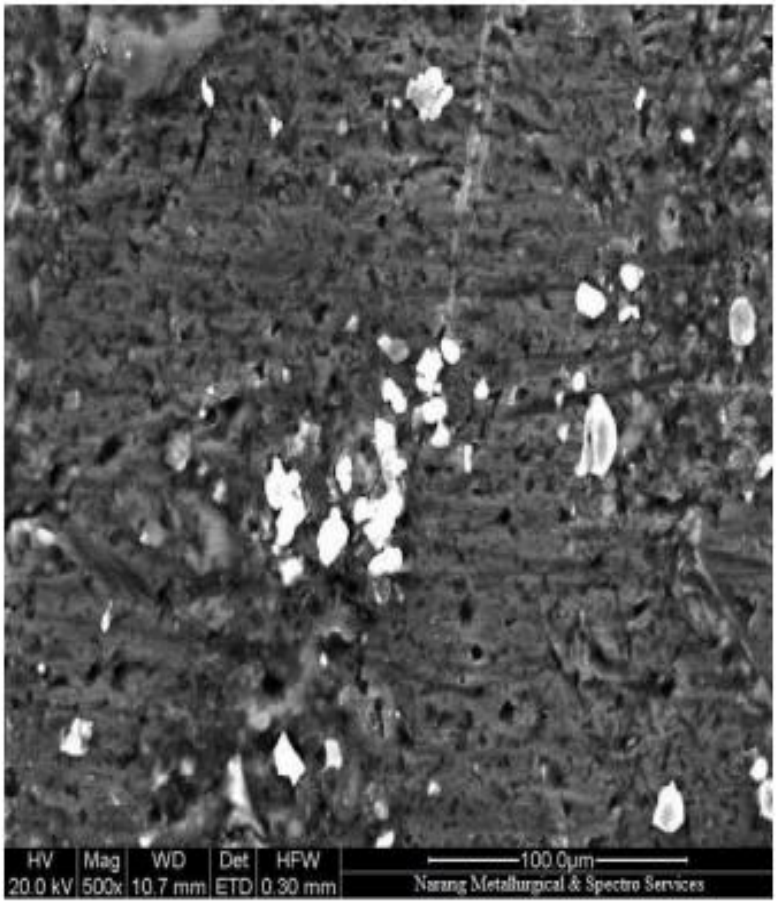
Fonte: MOSES et al, 2014.

Lakshmi et al. (2017) também desenvolveram compósitos pelo método de fundição por agitação, utilizando a liga AA6061 como material de matriz e reforçando com frações de peso de 10%, 15% e 20% de carbeto de silício. Como resultado, foi obtida a maior dureza na amostra com 15% de SiC e o aumento adicional

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

de reforço para 20% resulta em uma diminuição da dureza. A Figura 2 mostra uma imagem de MEV do compósito AA6061 – SiC 15%.

Figura 2 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de espécime composto de matriz de alumínio reforçado com SiC (15% em peso) submetido a ensaio de tração

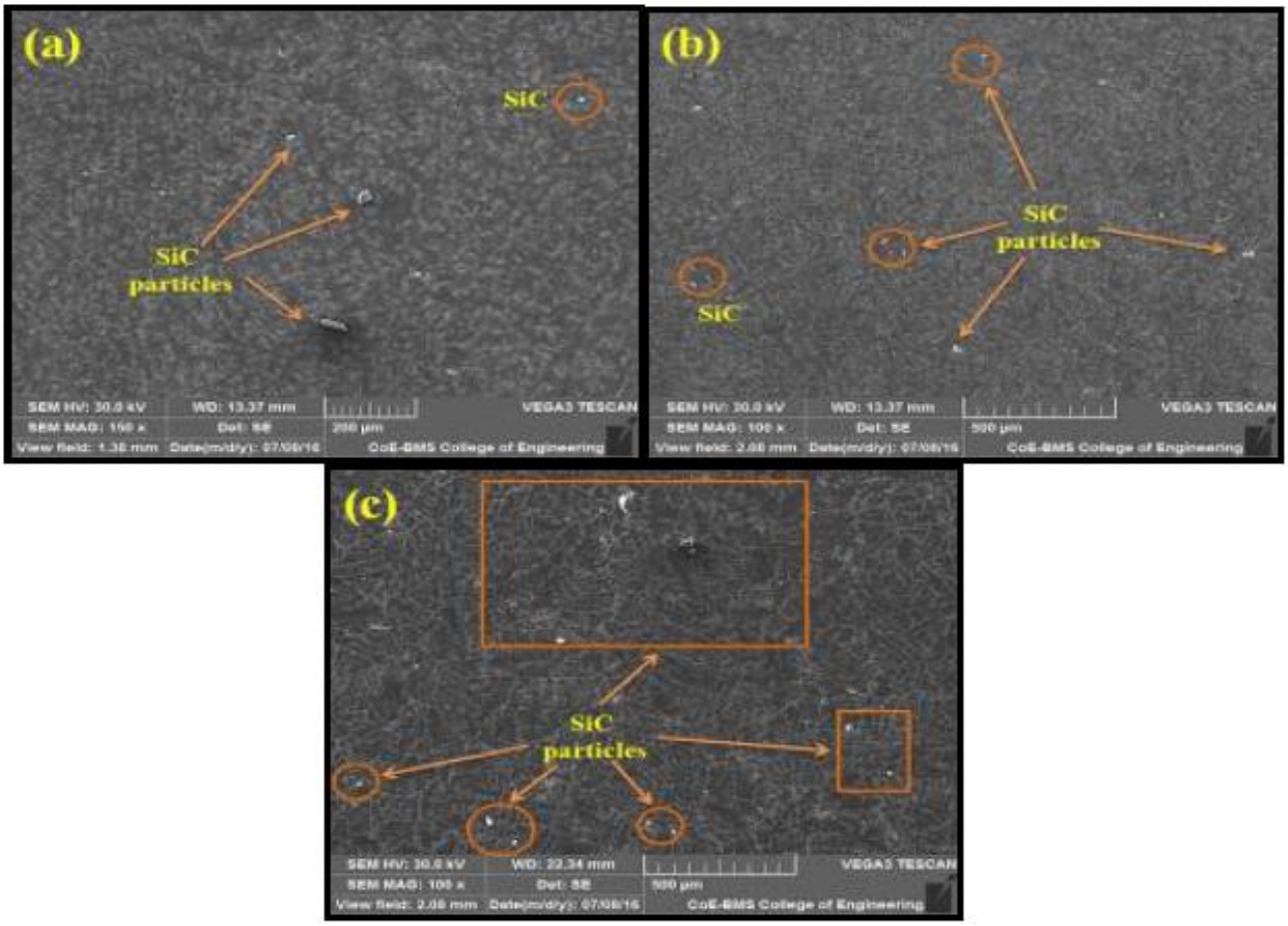


Fonte: LAKSHMI e KUMAR, 2011.

Mohanavel et al (2016), investigou e avaliou o comportamento tribológico de compósitos de carbeto de silício reforçando uma matriz de alumínio, fabricados por stir casting, Figura 3. A fração em peso de SiC variou de 0 a 12%, em incrementos de 4%. A resistência ao desgaste, a resistência à tração e a dureza dos compósitos foram significativamente melhoradas com a presença do reforço.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Figura 3 - Imagens de MEV (a) AA6351/4%SiC (b) AA6351/8%SiC (c) AA6351/12%SiC



Fonte: MOHANAVEL et al (2016)

O processamento por via líquida, de fundição com agitação, é amplamente empregado, pois permite alcançar a distribuição uniforme de elementos de reforço na matriz (BAINS, et al., 2016; HARICHANDRAN, et al., 2018) e por seu custo relativamente baixo, possibilitando a fabricação de formas complexas com mínimos defeitos e um maior aproveitamento dos metais (Li et al., 2016; RAMADOSS, et al., 2020).

De forma geral, o processamento via líquida com adição de partículas cerâmicas são eficientes para a incorporação na matriz de um volume de reforço de até 30% de partículas de 5 a 100μm. A baixa molhabilidade de cerâmicas por metais líquidos acaba sendo um problema no processo, podendo gerar nucleação de bolhas na interface entre partícula e matriz, que formam porosidades. A molhabilidade pode ser melhorada por meia da adição de elementos de liga ao banho, tratamento térmico ou recobrimento das partículas ou pelo simples pré-aquecimento das mesmas (SINGH et al, 2014; MAZAHERY et al, 2009; KAINER, 2006; NAHER et al, 2004).

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

2.3.2 Aplicações

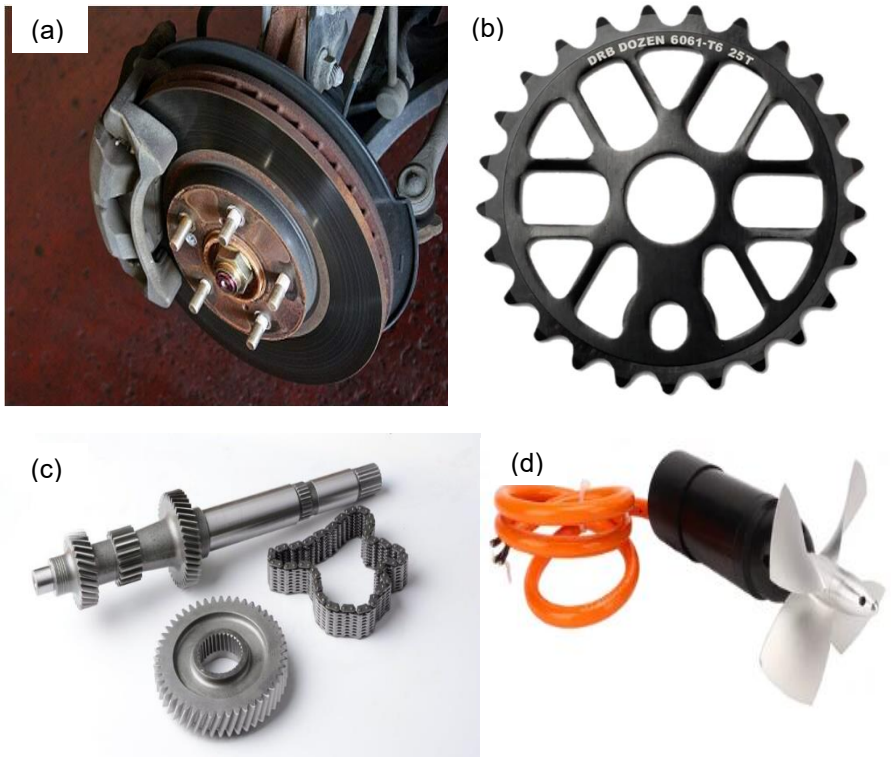
Por apresentar alta resistência, baixo custo e leveza, os compósitos de matriz metálica de alumínio são materiais populares em diversas aplicações industriais: nas indústrias de aviação, mecânica, elétrica, automotiva, eletrônica e de transporte (SHARMA et al, 2020).

Séries da liga 6XXX vem ganhando particular interesse nas indústrias de aviação e automotiva. A notável relação resistência/peso, aliado a melhor formabilidade, soldabilidade, resistência a corrosão e ao desgaste, e baixo custo, tornam-na um material em potencial para fabricação de veículos leves (MUKHOPADHYAY, 2012).

Segundo a *Aerosospace Specificacion Metal* (*ASM*) as principais aplicações para a Liga AA6061 T6 e AA6061 T651 são em acessórios de aeronaves, acessórios na indústria marítima, acessórios e conectores elétricos, pistões de freio, pistões hidráulicos e quadros de bicicleta (ASN, 2011).

A liga AA6061 também pode ser utilizado em componentes como pinças de freio, eixo de transmissão, rolamentos, coroa e quadro de bicicleta e hélices de propulsão subaquática. A Figura 4 ilustra esses componentes.

Figura 4 - Usos do AA6061 (a) pinça de freio; (b) coroa de bicicleta; (c) eixo de transmissão; (d) hélice de propulsão subaquática.



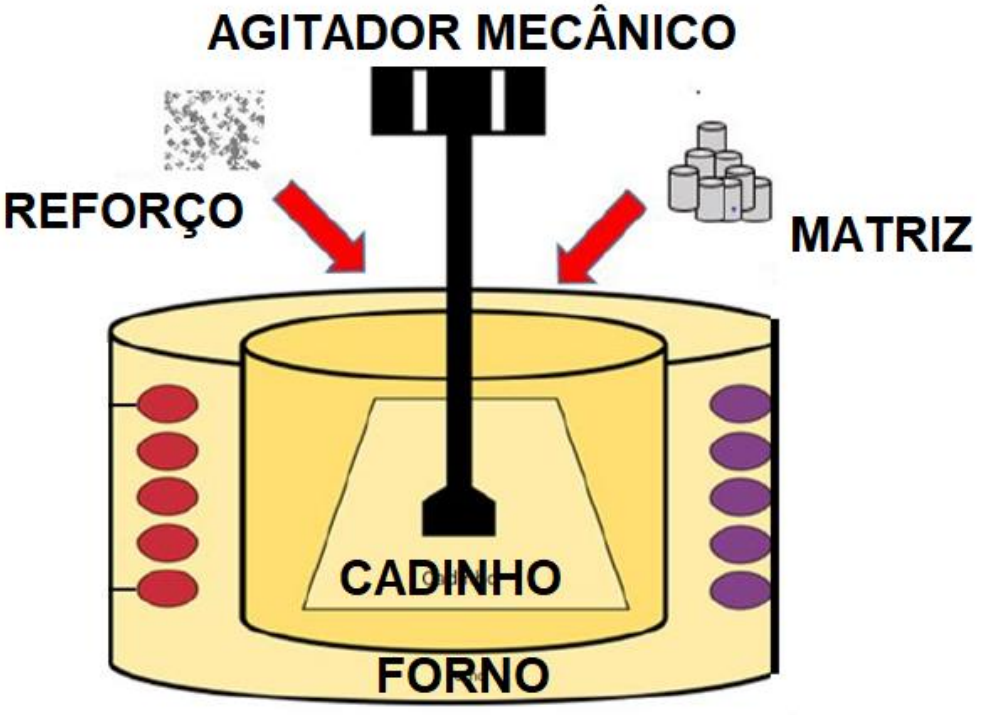
Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

2.4 FUNDIÇÃO POR AGITAÇÃO

Diversas técnicas podem ser utilizadas para preparação de compósitos, dentre elas a mais comumente usada é a de fundição. A fabricação em estado líquido envolve a dispersão dos reforços na matriz fundida (GARG et al, 2019). Esses métodos são mais econômicos em comparação aos métodos em estado sólido. A fundição com agitação é a técnica mais popular e comercialmente utilizada, pois é a mais econômica em comparação com outras técnicas de fabricação. Além de proporcionar uma dispersão relativamente homogênea e melhor molhabilidade (KUMARASWAMY et al 2018).

O *stir casting* envolve, principalmente, a mistura de uma fase dispersa na matriz, a qual é facilitada por um mecanismo de agitação. O pré-aquecimento dos reforços é frequentemente realizado para melhorar a mistura entre os materiais (ANNIGERI e VEERESH, 2017). As lâminas do agitador são fixadas a um eixo conectado a saída de um motor elétrico, que transmite o movimento rotacional (KADAM e SHINDE, 2020). A Figura 5 ilustra esse processo.

Figura 5 - Processo de fundição



Fonte: KAREEM et al. (2021).

Os parâmetros do processo têm um impacto substancial na determinação das características dos CMM. No entanto, parâmetros como tamanho

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

do reforço, a velocidade do agitador, o tempo de agitação, o design das lâminas do agitador e a temperatura de fusão são os que apresenta maior influência (DAS et al, 2016).

Rahman e Al Rashed (2014) produziram pela fundição com agitação um CMM reforçado com SiC, obtendo em seus resultados um aumento de dureza e resistência a tração, assim como aumento de resistência ao degaste em teste de pino sobre disco.

2.5 DESGASTE

Por definição da norma ASTM G40 (2015) o desgaste engloba a perda progressiva de material ou modificação de superfície de um objeto devido ao movimento relativo entre esta superfície e uma ou outras mais substâncias em contato. Sendo o desgaste uma das formas mais severas de degradação dos materiais (MARTINEZ, 2004). A resistência ao desgaste é a habilidade do material de ter uma vida útil relativamente elevada quando submetido aos vários tipos de mecanismos de desgaste: ataque (contato físico direto), desgaste por fusão, oxidação/difusão e plasticidade (DIAS, 2007).

Existe uma série de fatores que influenciam no desgaste do material, dentre eles suas características, condições de operação, variáveis geométricas e condições ambientais (BHUSHAN, 2013). Os mecanismos de desgaste podem ser classificados em quatro principais grupo: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste erosivo e fadiga superficial (BUDINSKI, 1988). A Tabela 4 resume os 4 diferentes mecanismos de desgaste.

Tabela 6 - Mecanismos de desgaste.

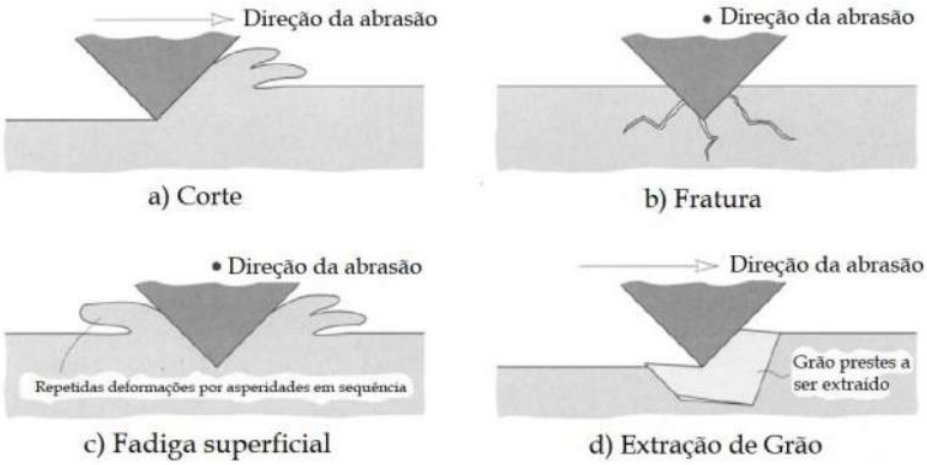
Mecanismo de desgaste	Descrição
Adesivo	Transferência de material de uma superfície a outra. As partículas que são removidas de uma superfície são permanentemente ou temporariamente aderidas à superfície do outro material.
Abrasivo	Ocorre devido a partículas ou protuberâncias duras forçadas ao longo de uma superfície sólida.
Erosivo	Perda de material da superfície que resulta do impacto repetitivo de pequenas partículas sólidas sob uma superfície.
Fadiga superficial	Danos superficiais causados por um contato de rolamento repetido.

Fonte: ASM, 2001; STACHOWIAK, 2005.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

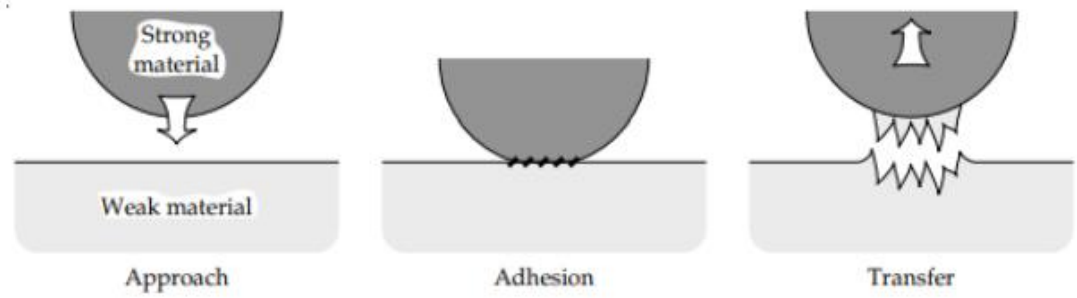
As Figuras 6 e 7 demonstram o esquema do mecanismo de desgaste abrasivo e adesivo respectivamente.

Figura 6 - Mecanismos de desgaste abrasivo: a) Por corte b) Fratura c) Fadiga d) Retirada de grão



Fonte: STACHOWIAK, 2005.

Figura 7 - Processo de transferência de metal por adesão.



Fonte: STACHOWIAK, 2005.

O desgaste pode surgir de maneira discreta majoritariamente, mas também pode ocorrer e se propagar rapidamente. É um fenômeno prejudicial, ocasionando folgas no movimento dos componentes, perda de precisão ou até falhas em equipamentos (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

A tribologia é a ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo, muitos de seus problemas requerem conhecimentos de várias áreas da ciência: ciência da superfície, química dos lubrificantes, design e características de máquinas, ciência dos materiais, reologia, mecânica dos fluidos, entre outras (TICHY et al, 2000). Os equipamentos projetados para medir e controlar as grandezas associadas ao desgaste são chamados de tribômetros, e o desgaste propriamente dito será medido a partir da medição de suas dimensões ou de sua massa (TREVISAN, 2013).

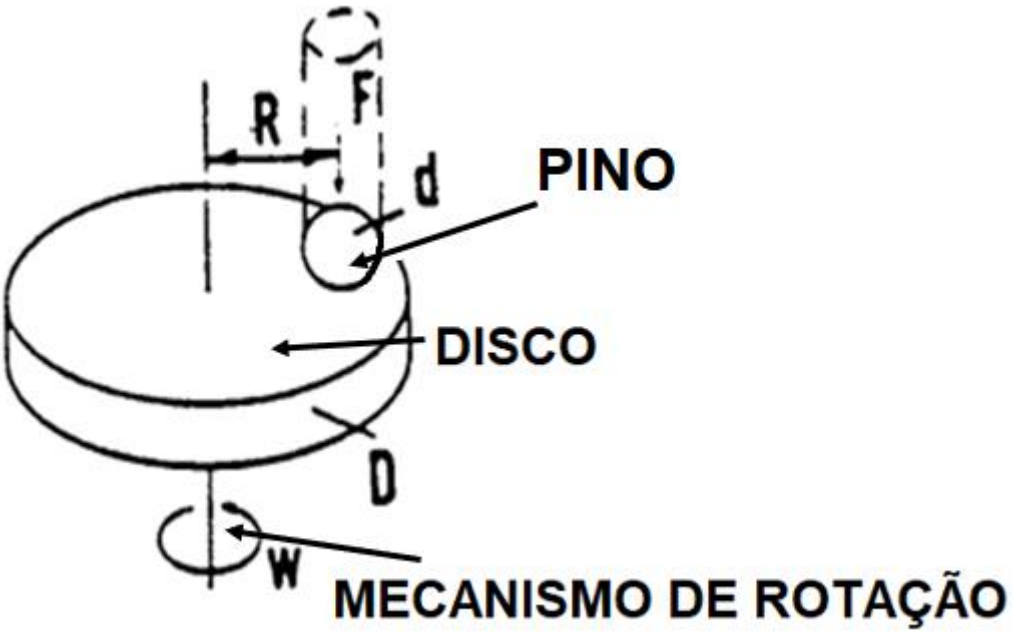
Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

2.5.1 Ensaio de desgaste pino sobre disco

Dentre os ensaios tribológicos de desgaste por deslizamento, o ensaio pino-disco é a configuração mais comum. Sendo que o corpo em um ensaio tribológico é o material testado em relação a outro material, chamado de contra corpo (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

Neste ensaio, um pino é posicionado perpendicularmente sobre a superfície de um disco, geralmente circular, que gira durante o teste. Uma carga determinada pode ser aplicada, pressionando o pino contra o disco em movimento. O desgaste é avaliado por meio da perda de volume do material, e pode ser determinado pela diferença de massa obtida por pesagens (ASTM G99-5). A Figura 8 traz uma ilustração do ensaio.

Figura 8- Esquema do sistema de teste de desgaste pino-disco.



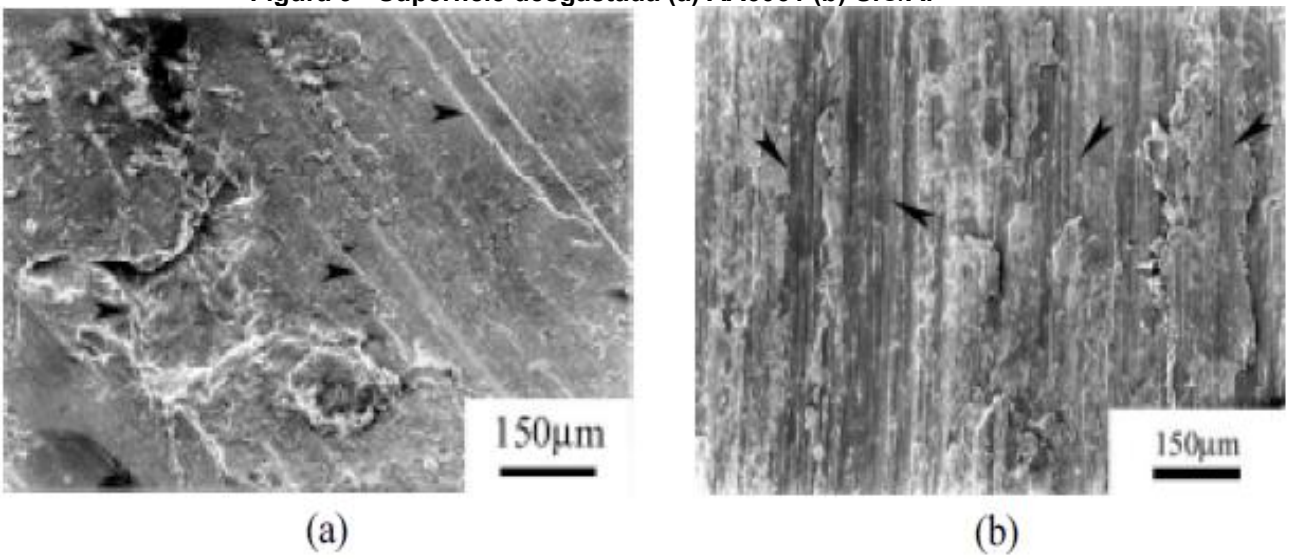
Fonte: ASTM G99-05

A norma ASTM G99-5 (2010), que rege o ensaio padrão do tipo pino-disco traz como parâmetros: carga da força aplicada em Newtons, velocidade de deslizamento entre as superfícies de contato em metros por segundo, distância de deslizamento acumulada em metros, temperatura de um ou ambos os corpos em locais próximos ao contato de desgaste e a atmosfera laboratorial.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Ahn e Ochiai (2002) analisaram o desgaste em amostras de AA6061 reforçadas com SiC/Al. Na Figura 9 (a), as setas sólidas indicam a presença de desgaste adesivo e abrasivo, atribuídos ao aumento da temperatura durante o ensaio. Já na amostra com reforço, representada na Figura 9 (b), observam-se predominantemente marcas de desgaste abrasivo.

Figura 9 - Superfície desgastada (a) AA6061 (b) SiC/Al

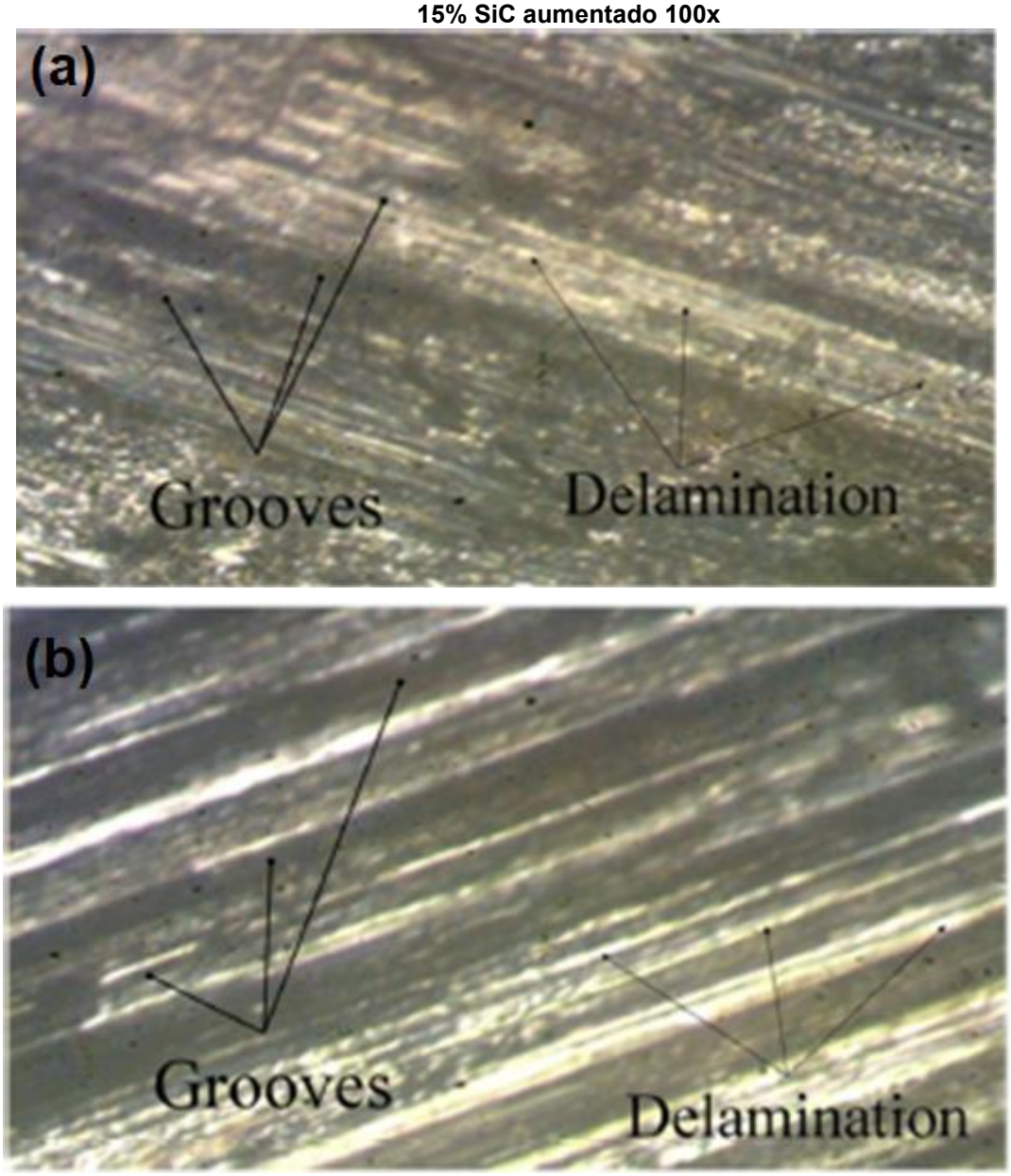


Fonte: AHN e OCHIAI (2002)

Mishra e Srivastava (2016) investigaram o comportamento do desgaste em compósitos de matriz AA6061 reforçados com partículas de carbeto de silício (SiC), em teores variando de 5% a 40% em peso. A Figura 10 apresenta os resultados do desgaste para compósitos contendo 5% e 15% de SiC. Observa-se a predominância de desgaste abrasivo, caracterizado pela presença de ranhuras, sulcos e delaminação na superfície das amostras.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Figura 10 - Fotografia de MEV das superfícies desgastadas (a) 5% SiC aumentado 100x (b) 15% SiC aumentado 100x

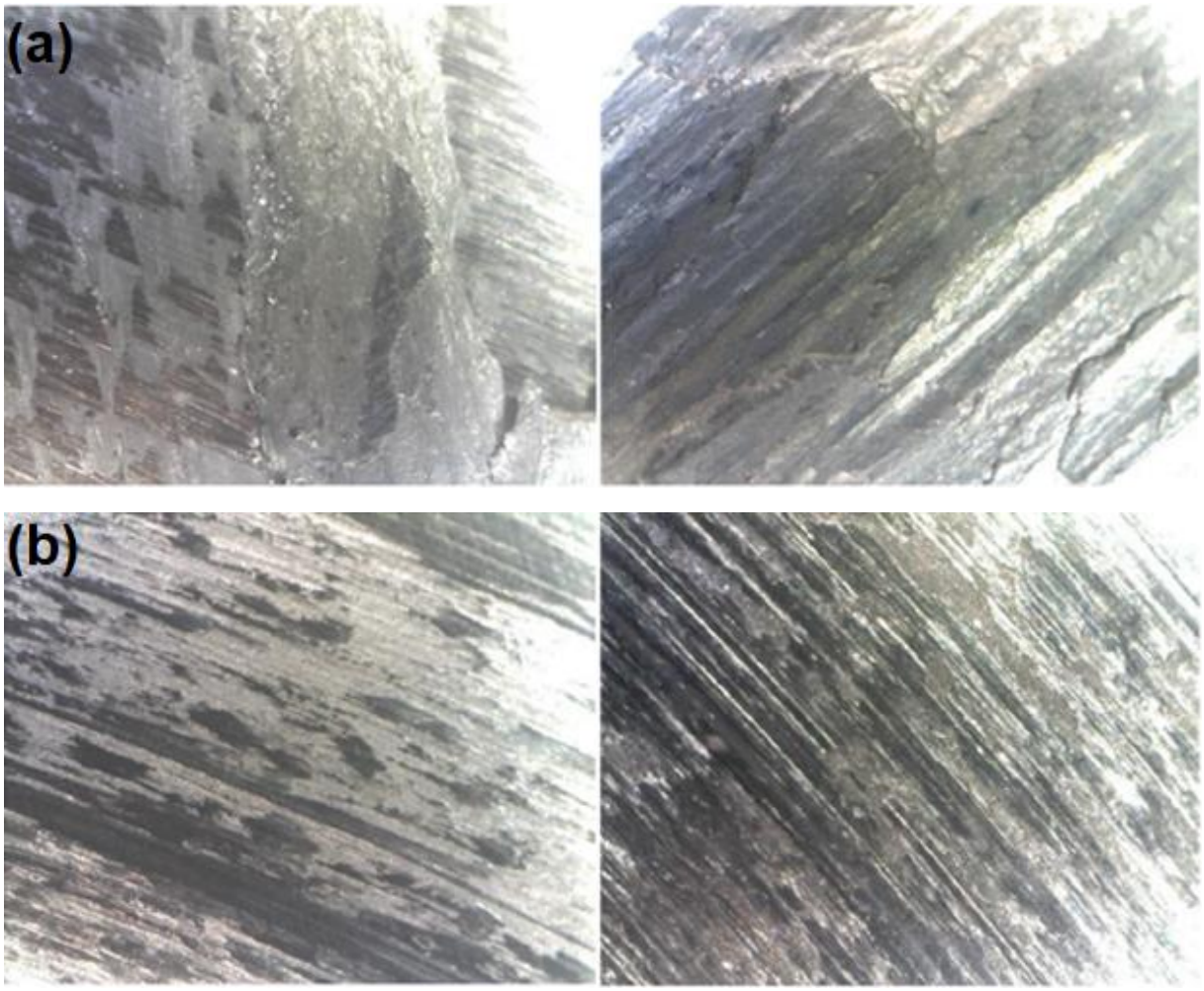


Fonte: MISHRA e SRIVASTAVA (2016)

Bhat e Kakandikar (2019) também estudaram o comportamento ao desgaste do compósito AA6061 reforçado com 5% de SiC, comparando-o com a liga sem reforço. Na Figura 11 (a), observa-se que a amostra sem reforço apresenta degaste por adesão, atribuído à natureza dúctil do AA6061, que favorece a aderência ao disco durante o ensaio. Em contraste, a amostra reforçada com SiC, mostrada na Figura 11 (b), não apresenta evidências de desgaste adesivo, indicando que a adição de reforço pode alterar o mecanismo de desgaste predominante.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Figura 11 - Trilha de desgaste (a) AA6061 (b) AA6061/5%SiC



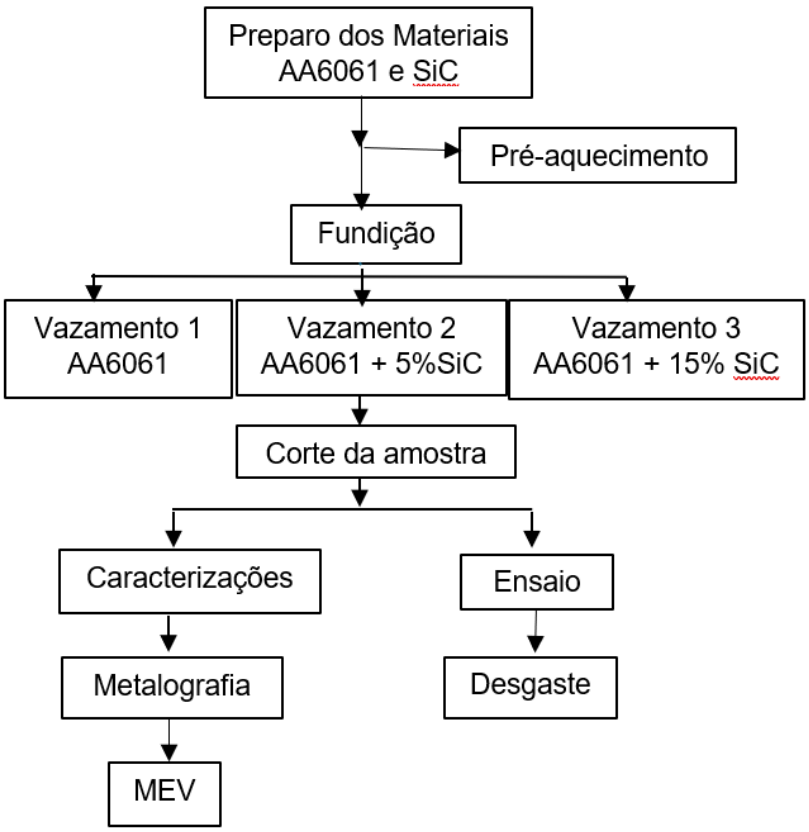
Fonte: BHAT e KAKANDIKAR (2019)

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 12 apresenta o fluxograma esquematizado com a sequência de desenvolvimento das etapas experimentais, facilitando a visualização e compreensão da metodologia adotada.

Figura 12 - Esquema da sequência do trabalho



3.1 MATERIAIS

A liga AA6061 foi escolhida por sua ampla aplicação na indústria, sendo uma das ligas mais estudadas na atualidade. A barra da liga adquirida pela empresa Oceantech.

O pó cerâmico de carbeto de silício (SiC) é comumente utilizado, por ter boas combinações em relação as suas propriedades, tais como alta dureza e alta condutividade térmica, resistencia ao desgaste e à corrosão,baixo custo e densidade reduzida(PEREIRA, 2016). O pó foi adquirido pela empresa F.F Comércio com granulometria nominal de 320 mesh.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

3.2 PREPARO DOS MATERIAIS

Considerando o procedimento experimental, com a adoção do processo de fundição, foi necessária a confecção do molde para verter o fundido e da caixaria de madeira com areia verde para manipulação do material utilizado, Figura 13.

Figura 13 - Caixaria para manipulação durante o processo de fundição

Fonte: Autor (2025)

Uma barra cilíndrica já perfurada transversalmente, adquirida na empresa Marumbi Ferro e Aço, foi adaptada para uso como molde. Para se adequar ao procedimento, a barra foi cortada e usinada conforme Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Cilindro usado para fabricar o molde

Fonte: Autor (2025)

Figura 15 –Moldes para o vazamento do fundido (Vertical)

Fonte: Autor (2025)

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

A liga de alumínio utilizada como matriz foi inicialmente fornecida em barra com comprimento de 1 metro. Para viabilizar o processo, tornou-se necessário seccionar essa barra em segmentos menores, com comprimento aproximado de 3 cm. O corte foi realizado utilizando a serra de fita modelo MR-122 disponível no Laboratório do Setor Sul da UNILA.

Com a liga devidamente preparada, procedeu-se ao preparo do cadinho, do molde e da vareta que foi usada como agitador. Visando facilitar o desmolde da peça fundida e otimizar a limpeza dos componentes após cada uso, aplicou-se uma fina camada de pó de grafite sobre as superfícies de contato com o fundido.

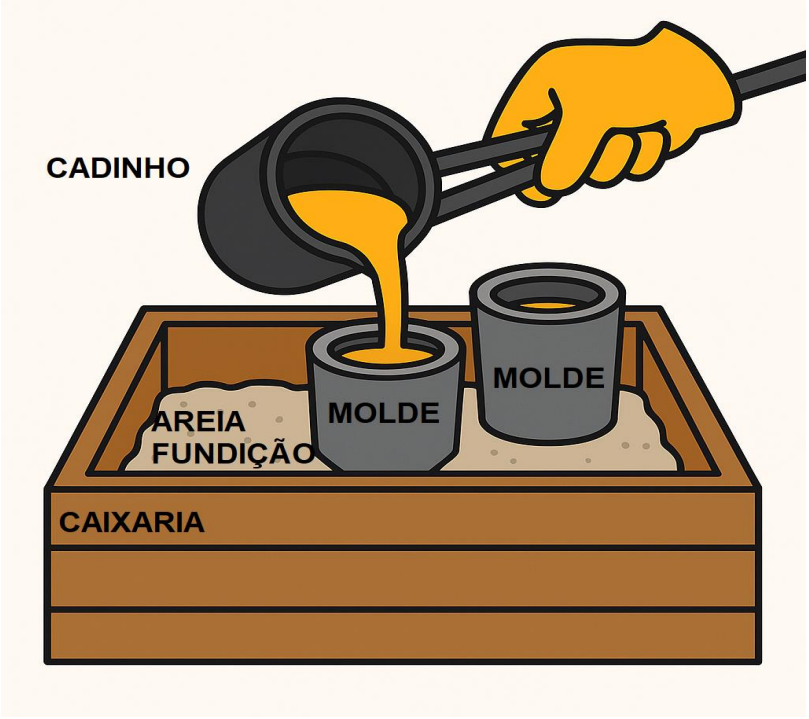
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta etapa, teve início o processo de fundição. O forno mufla modelo NOVUS N1030, localizado no Laboratório de Usinagem do Setor Sul da Unila, foi acionado e programado para temperatura de 750ºC e assim mantido pelo período de 1 hora, garantindo a estabilização da temperatura. Paralelamente, a liga AA6061 foi submetida a um pré-aquecimento a 150ºC em estufa de secagem modelo LUCADEMA do mesmo laboratório, com objetivo de minimizar o choque térmico no momento da introdução no forno. Finalizada essa etapa, a liga foi encaminhada ao forno para o início do processo de fusão, onde permaneceu por uma hora. Esse procedimento foi padronizado e mantido constante para todas as amostras.

O vazamento 1 foi realizado utilizando a liga AA6061 pura. Após a completa fusão da liga, o metal fundido foi vertido no molde previamente aquecido em estufa a 150ºC por 1 hora, com intuito de minimizar gradientes térmicos durante a solidificação. Em seguida, a amostra foi resfriada ao ar, em temperatura ambiente. A Figura 16 ilustra o procedimento adotado nessa etapa e a Figura 17 a situação final.

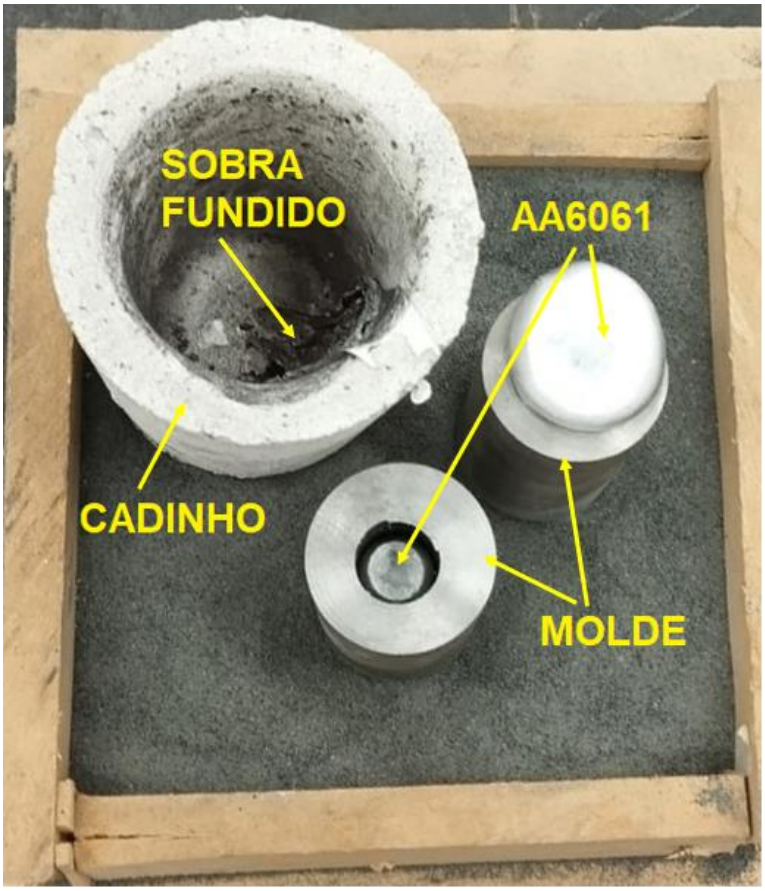
Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Figura 16 - Esquema do metal fundido sendo vertido no molde.



Fonte: Autor (2025).

Figura 17 - Liga AA6061 solidificando no molde após ser vertido.



Fonte: Autor (2025)

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Os vazamentos 2 e 3 foram conduzidos seguindo o mesmo procedimento adotado no vazamento 1, tendo como única variação a adição de diferentes porcentagens em massa de carbeto de silício (SiC) às respectivas matrizes de alumínio. Para a adição do reforço particulado, o SiC foi acondicionado em um fino invólucro de papel alumínio no formato retangular e pré-aquecido a 150ºC por 1h em estufa, Figura 18, baseado na metodologia descrita por Hadad et al. (2020). Em seguida, foi depositado na superfície do alumínio fundido.

Figura 18 - Amostra de AA6061 para fundição e pó de SiC preparado com fina camada de papel alumínio

Fonte: Autor (2025)

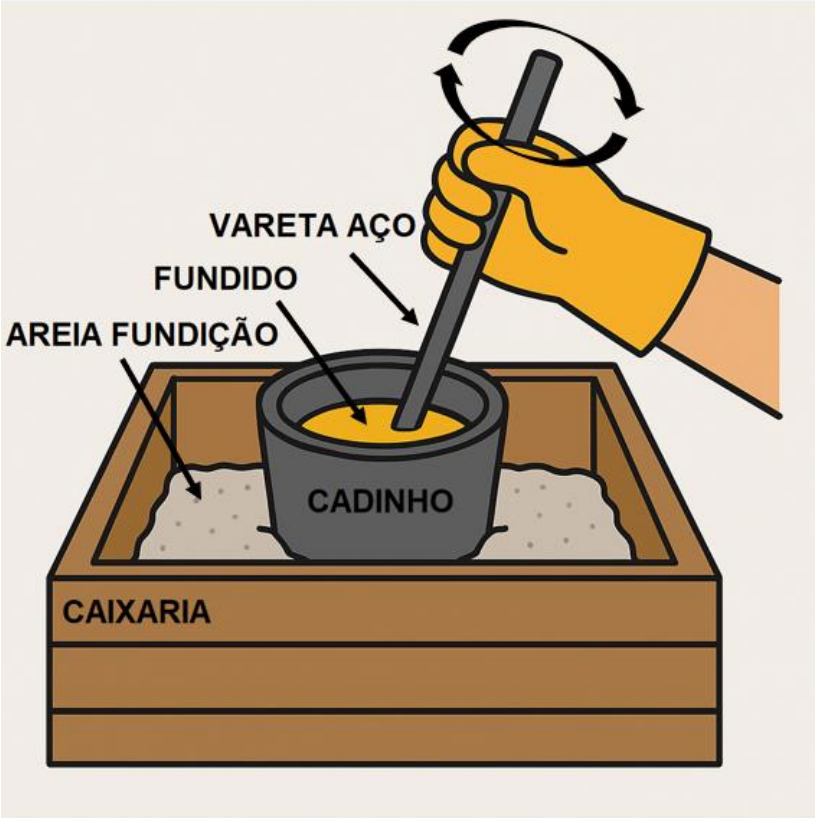
As porcentagens em massa de carbeto de silício (SiC) utilizadas nos vazamentos 2 e 3 foram de 5% e 15%, respectivamente. O cálculo da massa de reforço a ser adicionada foi feito com base na massa inicial da amostra da liga AA6061, de acordo com a seguinte equação:

$$m\,SiC = \%\frac{SiC}{100}\ x\ m\,AA6061 \quad (4)$$

Após a introdução do reforço particulado na superfície do alumínio fundido, ele foi homogeneizado manualmente com auxílio de uma vareta de aço inoxidável revestida com pó de grafite, a fim de evitar contaminação e promover a incorporação eficiente das partículas. Em seguida, o cadinho retornou à mufla, onde permaneceu por 15 minutos para reaquecimento. Após esse período, foi retirado para nova agitação, realizada durante 1 minuto. Esse ciclo de reaquecimento e agitação foi repetido até que se completassem 5 minutos totais de agitação do material. A Figura 19 ilustra esse processo.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Figura 19 - Etapa do processo de agitação para homogeneização do compósito



Fonte: Autor (2025)

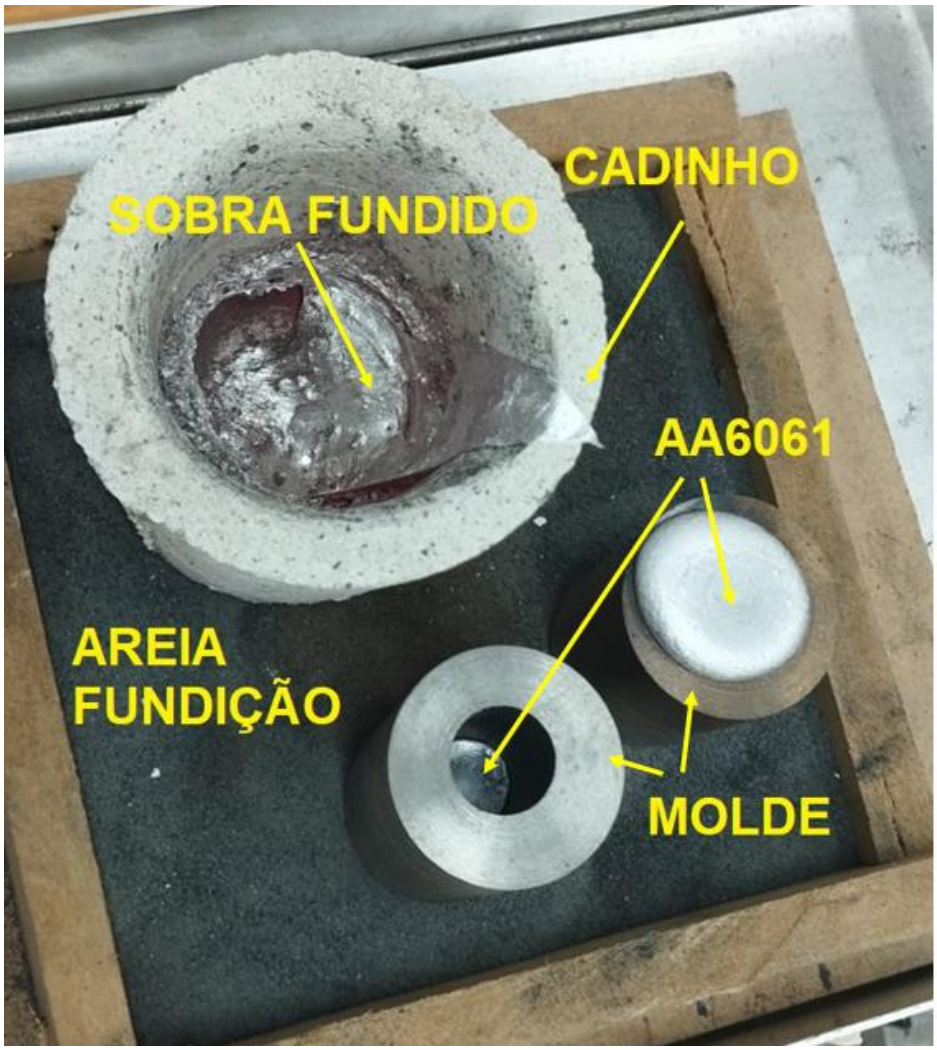
Figura 20 - Aspecto final do fundido de AA6061 com reforço de SiC.

Fonte: Autor (2025).

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Com o compósito devidamente preparado, procedeu-se ao vazamento no molde, que também foi previamente aquecido a 150ºC para minimizar o choque térmico. Em seguida, a amostra foi resfriada ao ar, em temperatura ambiente, conforme Figura 21.

Figura 21 - Liga AA6061 com reforço de SiC solidificando no molde após ser vertido.



Fonte: Autor (2025)

3.3.1 Macroestrutura

Após o resfriamento e desmolde, foi possível realizar uma análise macroestrutural comparativa das três amostras produzidas. A avaliação foi feita por meio de inspeção visual direta, sem qualquer preparação prévia das amostras, permitindo observar diferenças iniciais na homogeneidade e na aparência geral das amostras.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

3.3.2. Metalografia

A análise microestrutural das amostras seguiu as seguintes etapas: lixamento, polimento, ataque químico e observação microscópica em microscópio eletrônico de varredura (MEV). O processo começou com o lixamento das amostras utilizando lixas d'água de granulometrias progressivas, com o objetivo de remover irregularidades superficiais e preparar adequadamente a superfície para o polimento subsequente.

O lixamento foi realizado com lixas de grana 100, 200, 400, 600, 1200 e 2000, adotando tempos de lixamento menores para granas mais finas e maiores para as granas mais grossas. A troca de lixa ocorreu somente quando todos os riscos na superfície da amostra apresentavam a mesma orientação. Entre cada mudança de granulação, a amostra foi rotacionada em 90º. Na etapa seguinte, procedeu-se ao polimento utilizando uma solução de alumina 1 µm, empregando água destilada como lubrificante.

Para revelação microestrutural das amostras, foi utilizado o reagente Keller. As amostras foram imersas em solução por aproximadamente 10 segundos, seguidas de lavagem imediata com água destilada. A amostra então foi levada ao microscópio para análise da superfície, sendo necessário repetir o processo por mais 10 segundos para obter o resultado desejado.

3.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O pó de carbeto de silício (SiC) utilizado como reforço, a matriz de alumínio e os compósitos preparados foram submetidos à análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o modelo EVO-MA10, localizado no Laboratório de MEV da Unila. As análises foram realizadas em dois momentos: antes e após a execução do ensaio de desgaste.

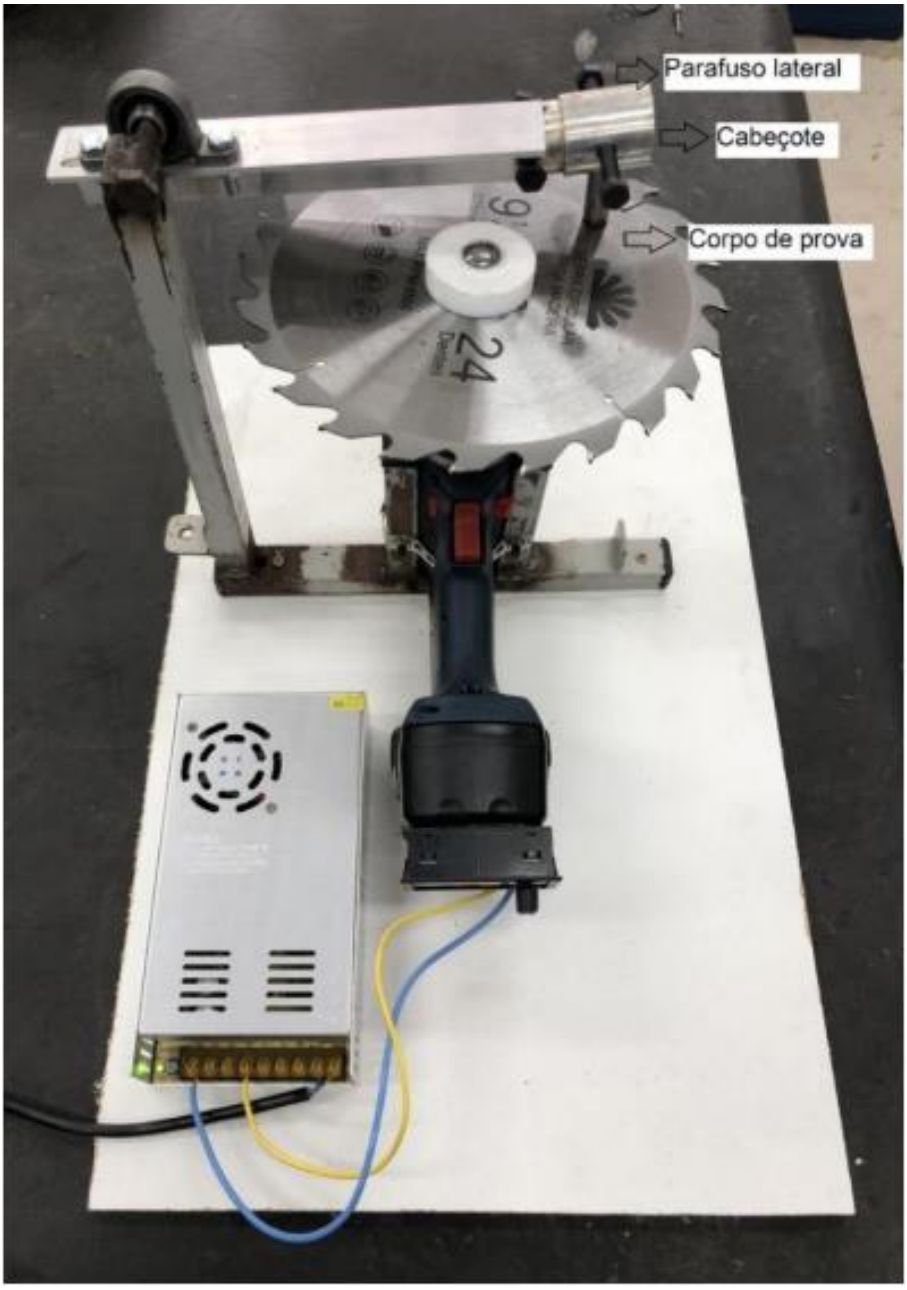
3.3.4 Ensaio de desgaste

Utilizando um tribômetro elaborado por Luzia (2022), Figura 22, realizou-se o ensaio com os devidos cuidados para evitar impactos ou desalinhamentos que poderiam comprometer a estabilidade do pino. A Figura 23

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

representa um esquema do tribômetro utilizado. Para possibilitar a aplicação de carga durante o ensaio, foram feitas algumas adaptações.

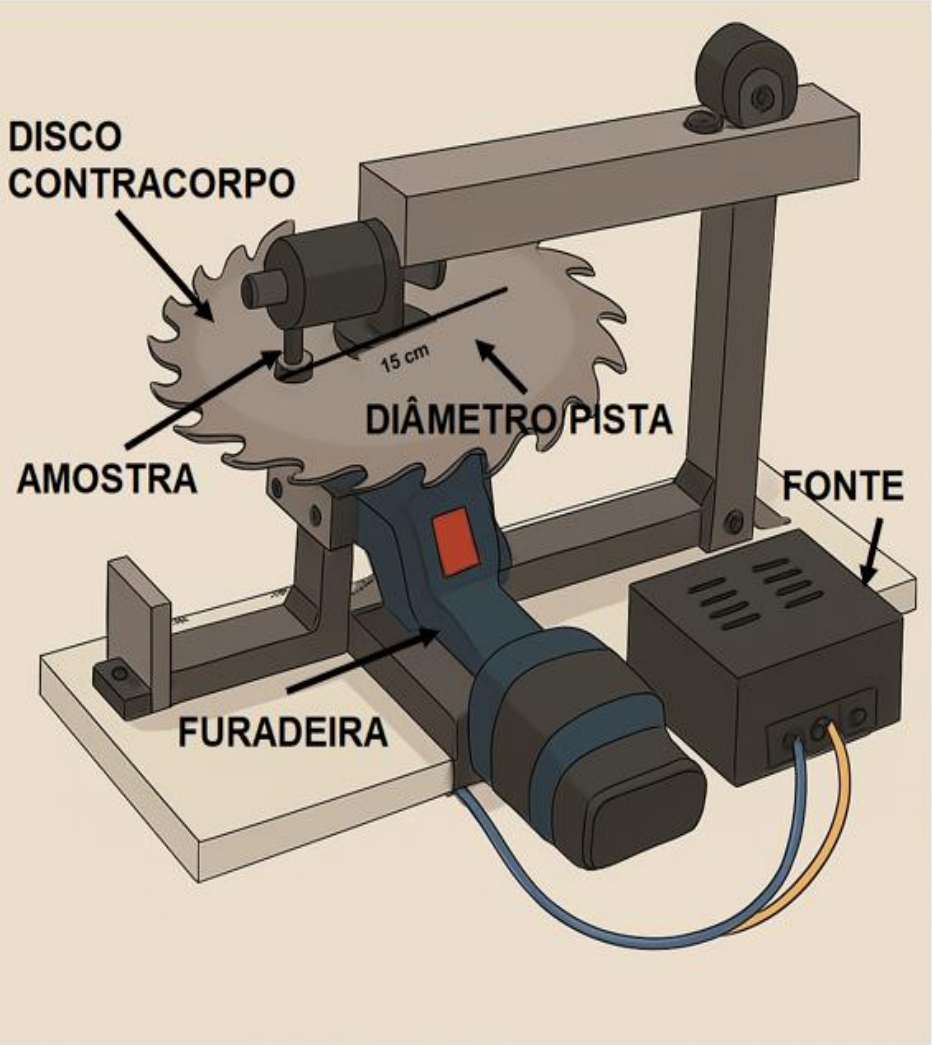
Figura 22 - Equipamento desenvolvido por Luzia.



Fonte: Luzia (2022)

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Figura 23 - Esquema do tribômetro.



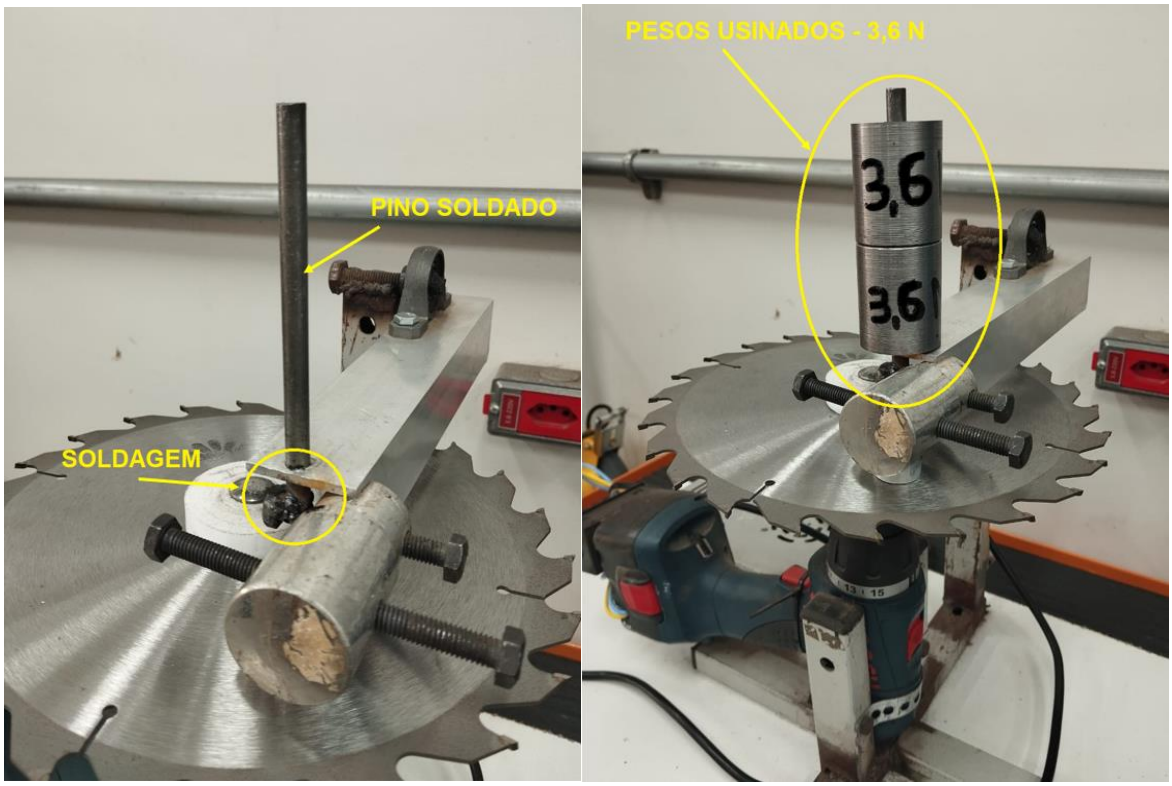
Fonte: Autor (2025)

Um pino de aço baixo carbono foi cortado e fixado na superfície do parafuso onde o porta amostra foi posicionado. Para garantir a compatibilidade dos materiais na soldagem, foi preciso perfurar a barra de alumínio, de forma a soldá-la diretamente no parafuso da estrutura, que era feito de aço.

Para atuar como carga no ensaio, uma barra cilíndrica de aço baixo carbono foi cortada e usinada. Por ser uma barra maciça, foi necessário realizar um furo transversal com diâmetro compatível com o pino de suporte. O procedimento foi executado em torno mecânico modelo Nardini Mascote MS 205 do Laboratório de Usinagem do Setor Sul da Unila. O furo foi iniciado com uma broca de 2 mm de diâmetro, sendo ampliado gradualmente em incrementos de 2 mm até atingir o diâmetro final de 8 mm. A ilustração está na Figura 24.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

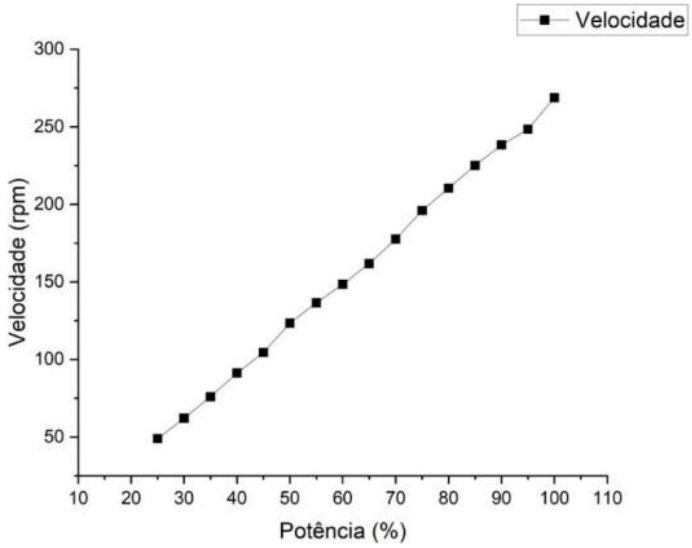
Figura 24 - Adaptação realizada na máquina de ensaio para adicionar carga variável



Fonte: Autor (2025)

Utilizando como base o gráfico desenvolvido por Luzia (2022), Gráfico 1, para o tribômetro e convertendo a medida de RPM para m/s, foi definida a potência utilizada durante o ensaio.

Gráfico 1 - Velocidade em RPM pela potência do equipamento



Fonte: LUZIA (2022)

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Sabendo que o diâmetro do contra-corpo de ensaio era de 15 cm, a velocidade de deslizamento em metros por segundo (m/s) pôde ser calculada com base na rotação por minuto (RPM), utilizando a Equação 5.

$$\frac{m}{s} = (\pi * diâmetro\ em\ metros * RPM)\ \div\ 60 \quad (5)$$

Com a equação, foi possível gerar a Tabela 7, relacionando diferentes rotações com suas respectivas velocidades. De acordo com a norma ASTM G99 e estudos já realizados sobre desgaste, a faixa de velocidade normalmente empregada situava-se entre 0,4 e 1,6 m/s. Assim, foi adotada uma velocidade de ensaio de 0,8 m/s, correspondendo a 100 RPM, o que equivalia a uma potência de operação de aproximadamente 40%.

Tabela 7 - Ajuste de RPM para m/s

Velocidade	
rpm	**m/s**
50	0,39
100	0,79
150	1,18
200	1,57
250	1,96
300	2,36

Fonte: Autor (2025)

No ensaio de desgaste, o corpo de prova utilizado foi a própria amostra, enquanto o contra-corpo consistiu em um disco de aço. A velocidade de rotação do disco foi mantida constante durante todo o ensaio, e a carga aplicada sobre a amostra foi de 7,2 N.

A duração total do ensaio foi de 50 minutos, correspondendo a uma distância de deslizamento de 2400 metros. A avaliação da perda de massa foi realizada em três etapas: uma medição inicial antes do ensaio, uma segunda após 1000 metros percorridos (aproximadamente 20 minutos) e uma terceira após mais 1400 metros (30 minutos adicionais), totalizando os 2400 metros ao final dos 50 minutos de teste.

O desgaste das amostras foi avaliado com base na perda de massa registrada em cada etapa do ensaio, bem como na análise qualitativa das superfícies por meio das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

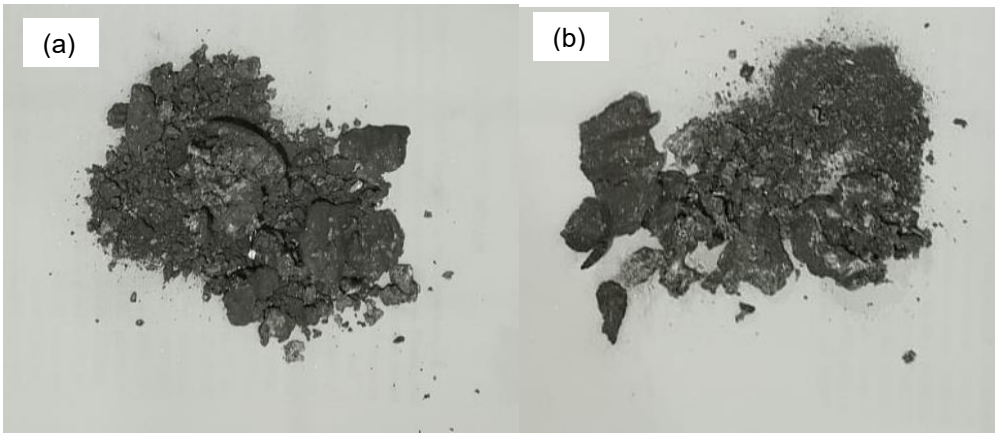
4.1 FUNDIÇÃO

O processo de fundição foi conduzido conforme a metodologia descrita anteriormente. A base experimental adotada foi o processo de fundição por *stir casting*; contudo, devido à indisponibilidade de forno específico para a agitação automatizada na Unila, o método foi adaptado para permitir agitação manual com uma vareta de aço inoxidável em intervalos pré-definidos.

No vazamento 1, em que foi utilizada apenas a liga de alumínio sem adição de partículas cerâmicas, a fundição ocorreu conforme o esperado, sem intercorrências. Já nos vazamentos 2 e 3, que envolveram a incorporação de carbeto de silício (SiC) como reforço, foram observadas algumas dificuldades durante o processo. Notou-se aglomeração do pó nas paredes internas do cadinho e considerável quantidade de reforço residual não incorporado após o vazamento, conforme Figura 25.

Tais problemas estão possivelmente relacionados à baixa eficiência de agitação pela natureza manual do processo. Considerando a elevada temperatura, o tempo de mistura em cada pausa pode ter sido insuficiente para garantir a homogeneização adequada das partículas no banho metálico. Além disso, a baixa molhabilidade do carbeto de silício (SiC) pela matriz pode ter sido influenciada pelos parâmetros definidos para o pré-aquecimento do pó, como tempo e temperatura.

Figura 25 - Resíduo de pó de SiC e alumínio no cadinho após fundição: (a) Sobra AA6061 5% SiC (b) Sobra AA6061 15% SiC



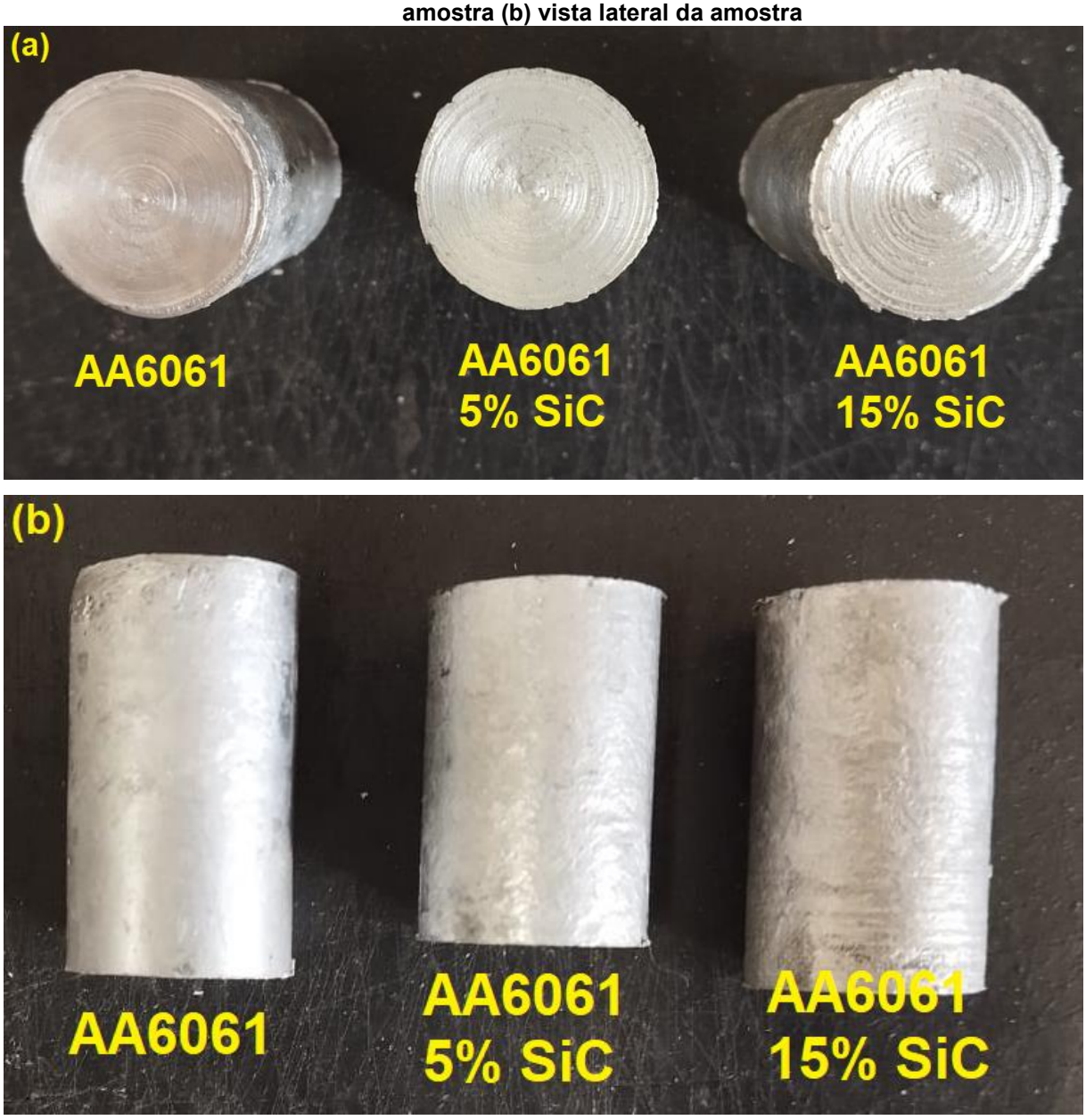
Fonte: Autor (2025)

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

4.2 MACROESTRUTURA

Após o desmolde, foi possível realizar uma análise macroestrutural visual das três amostras obtidas. Conforme esperado, a incorporação de carbeto de silício influenciou na formação do material, afetando a uniformidade da estrutura final.

Figura 26 - Macroestrutura das amostras após fundição e desmolde (a) vista superior da amostra (b) vista lateral da amostra



Fonte: Autor (2025)

Espera-se que a adição de partículas cerâmicas interfira na solidificação do metal, atuando como núcleos de cristalização. Esse mecanismo pode afetar tanto o tamanho quanto a morfologia dos grãos, além de impactar na homogeneidade do material.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Conforme a Figura 26, observou-se que com aumento da porcentagem em massa de carbeto de silício (SiC) houve um aumento na rugosidade aparente na superfície lateral do material, podendo estar relacionada com a má homogeneização do reforço e acúmulo na superfície.

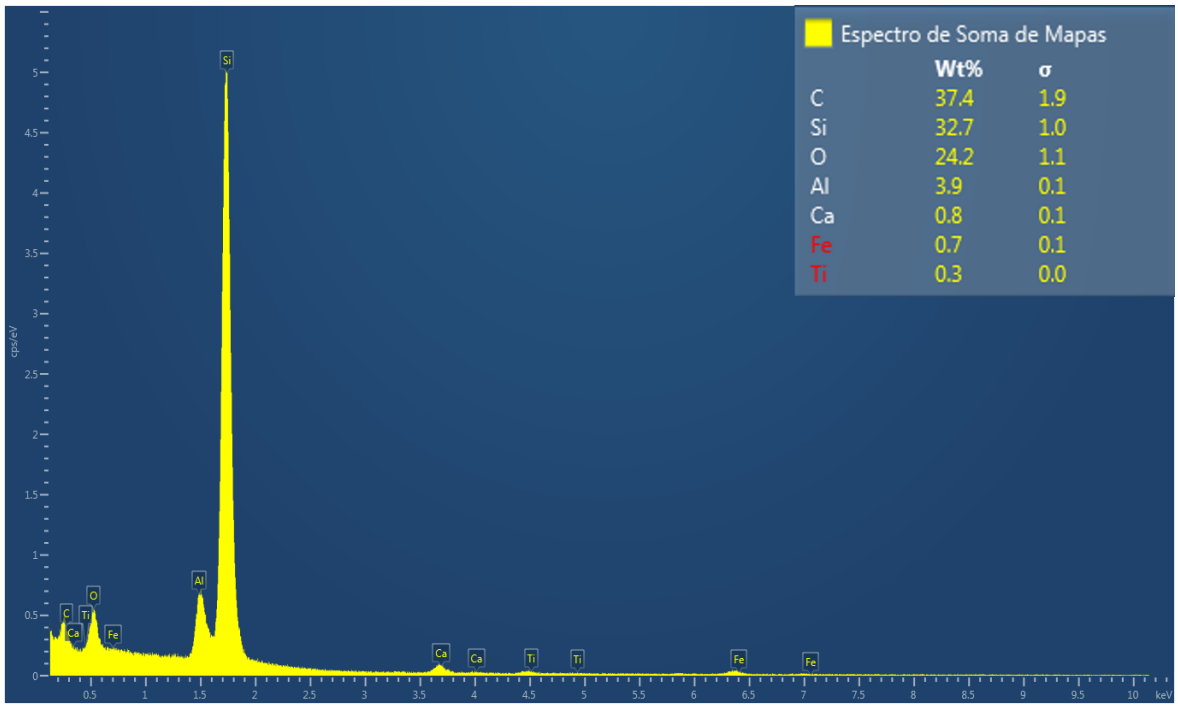
A superfície superior foi usinada para planar a superfície, sendo utilizado líquido refrigerante durante o processo. Manteve-se a rugosidade mais aparente nas amostras com maior concentração de reforço, demonstrando tendência à aglomeração e à formação de poros, o que favorece o destacamento de partículas e a consequente geração de cavidades. Somado a isso, a redução da ductilidade da matriz de alumínio com o aumento do reforço dificulta o escoamento plástico homogêneo, contribuindo para marcas mais pronunciadas no acabamento (JAMES e ANNAMALAI, 2018).

4.3 MICROESTRUTURA

A caracterização do pó de carbeto de silício (SiC) por MEV e EDS revelou uma distribuição heterogênea no tamanho das partículas, evidenciando grãos com dimensões variadas. A análise de EDS indicou a presença de oxigênio em níveis significativos, sugerindo que o material não apresenta elevada pureza. A Figura 27 apresenta o espectro de EDS do pó, enquanto a Figura 28 mostra a morfologia das partículas observada por MEV.

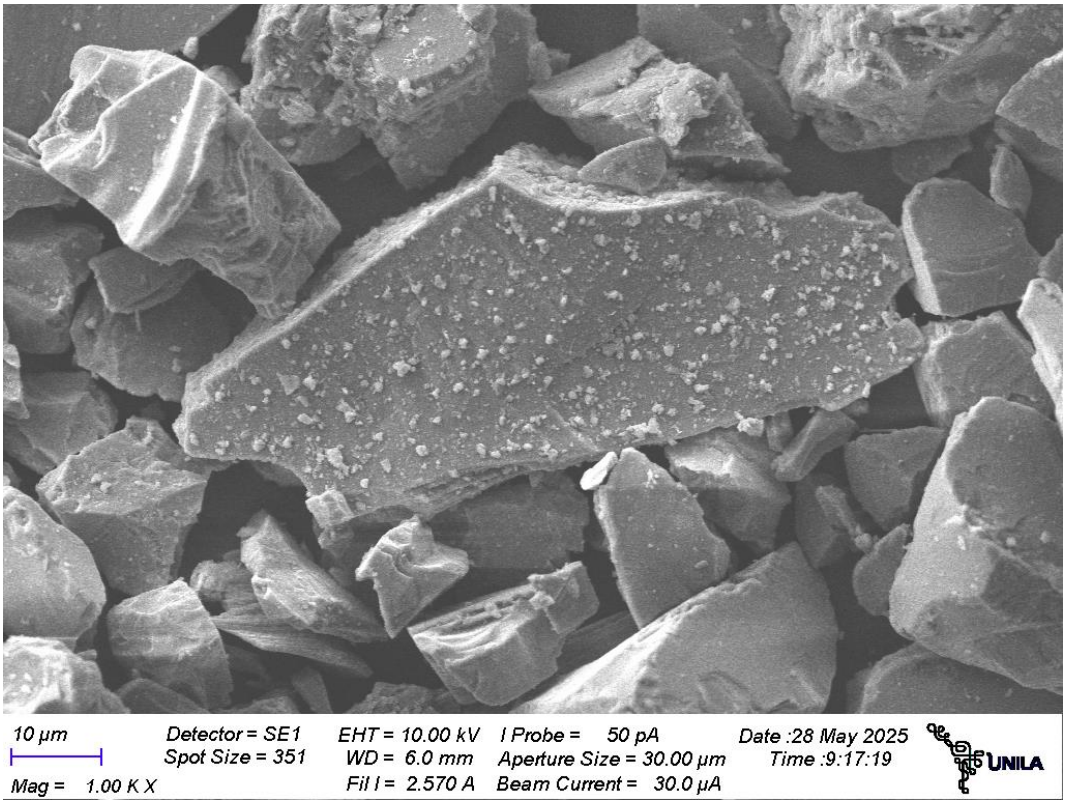
Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Figura 27 - EDS do pó de SiC



Fonte: Autor (2025)

Figura 28 – Imagem de MEV do pó de SiC aumentado em 1000x.



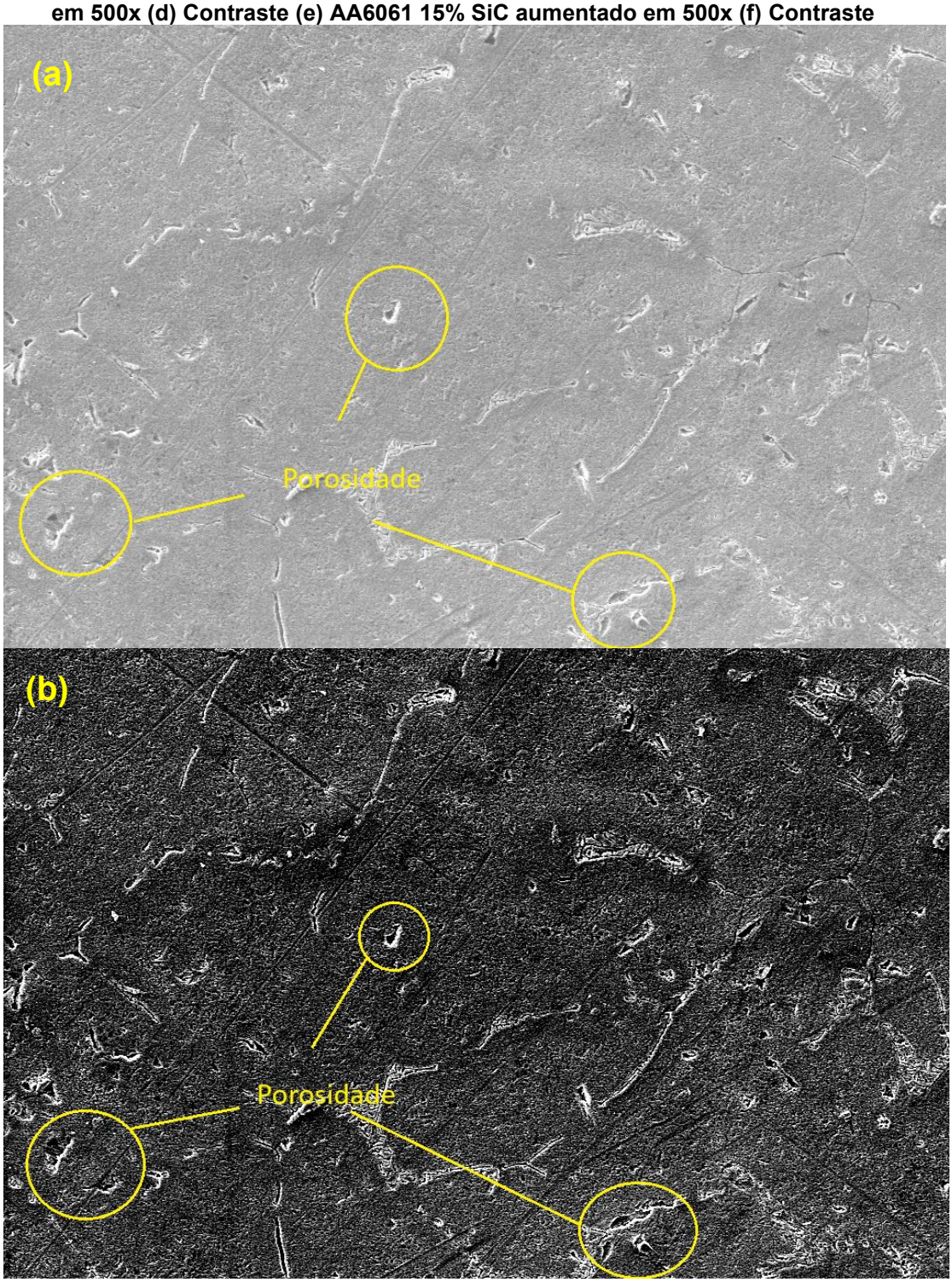
Fonte: Autor (2025)

Na sequência, foram analisadas as amostras obtidas por fundição, compostas por AA6061, AA6061 5% SiC e AA6061 15% SiC. A Figura 29 apresenta

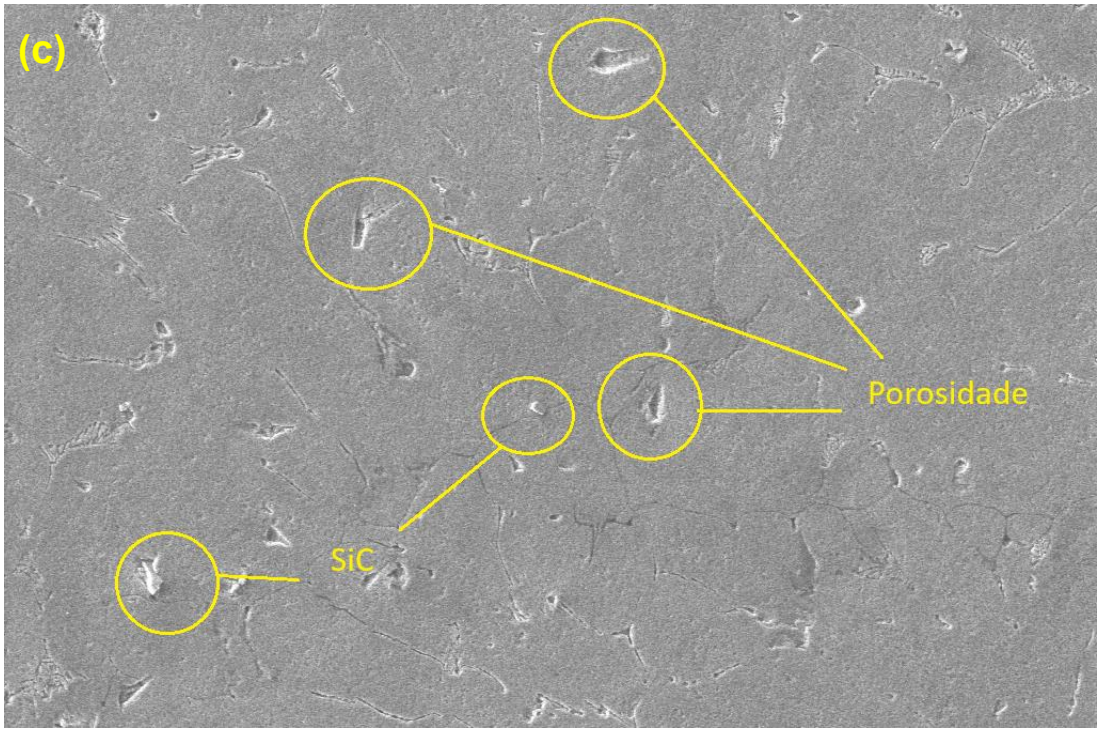
Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

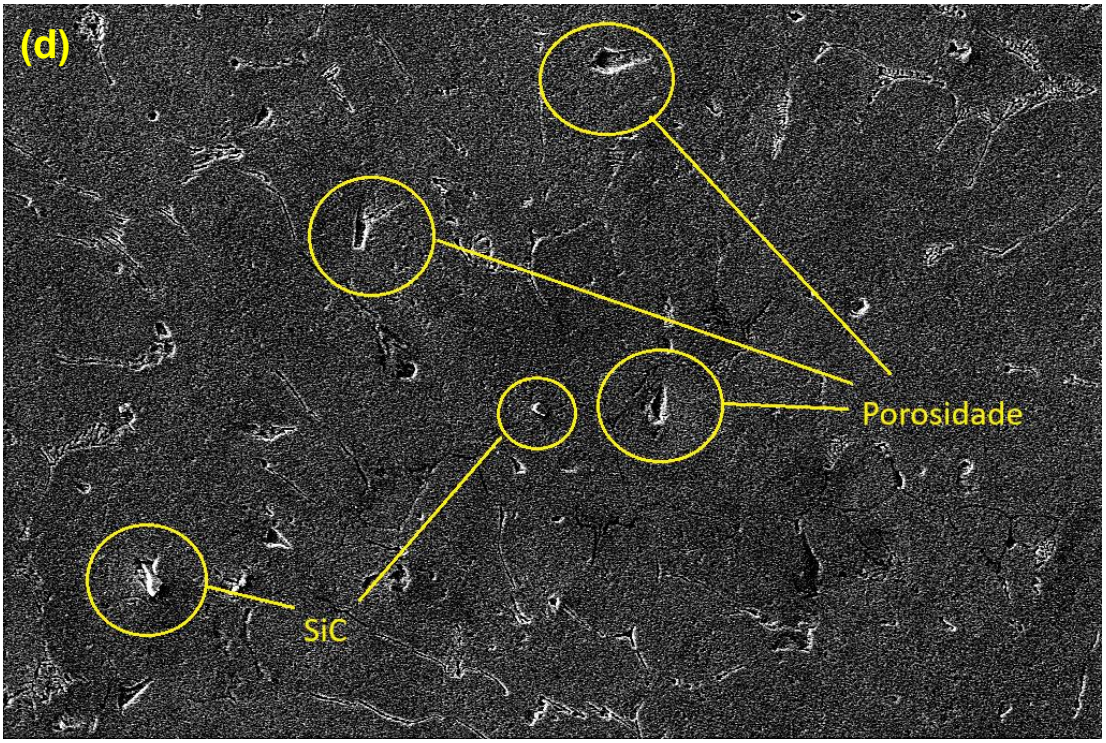
a microestrutura de cada uma das amostras, permitindo a comparação dos efeitos da adição de partículas cerâmicas na morfologia do material. A morfologia da superfície se assemelha com a encontrada por Mohanavel et al (2016) na Figura 3.

Figura 29 - MEV (a) AA6061 aumentado em 500x (b) Contraste (c) AA6061 5% SiC aumentado em 500x (d) Contraste (e) AA6061 15% SiC aumentado em 500x (f) Contraste

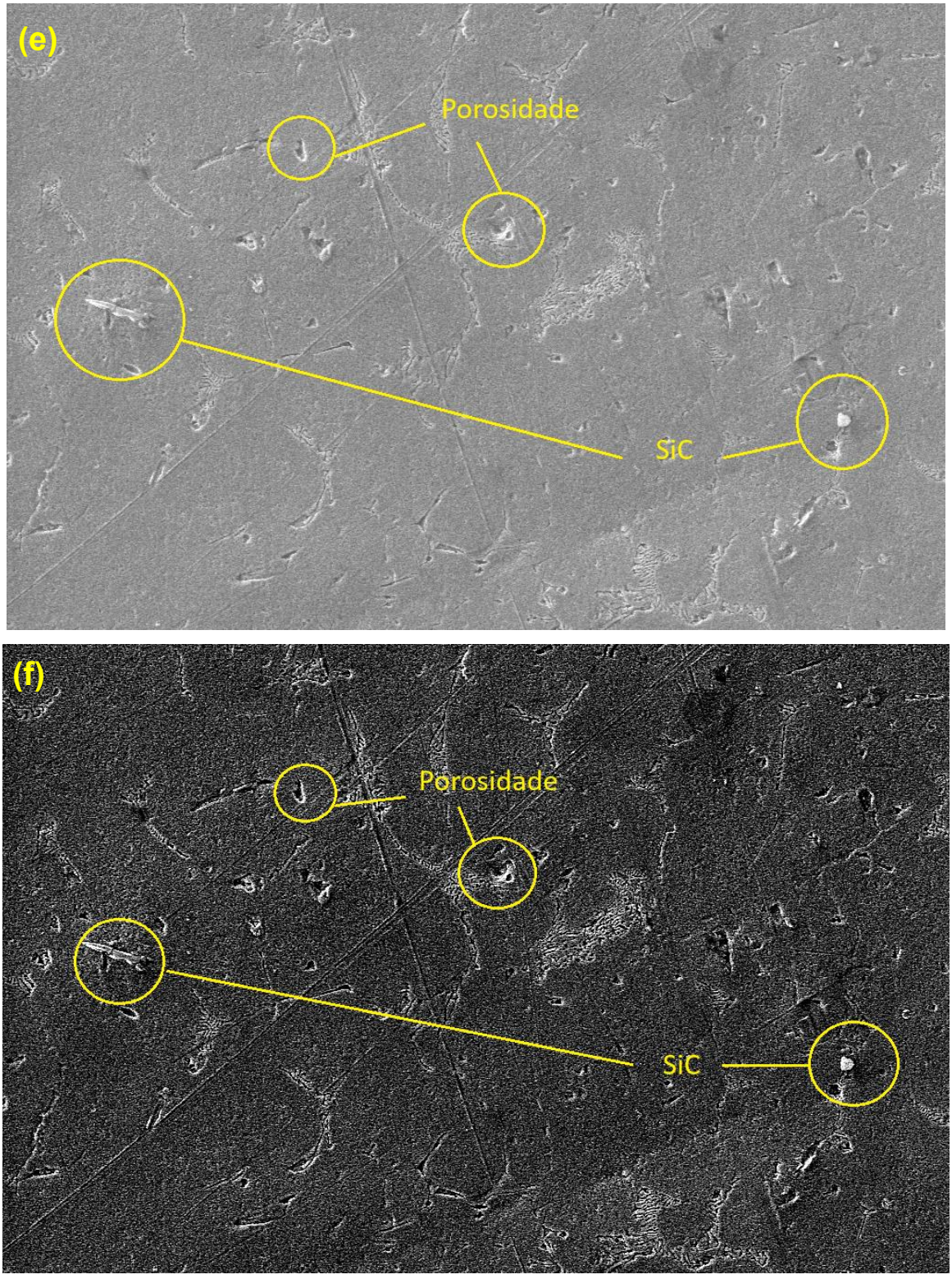


Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46





Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46



Fonte: Autor (2025)

Observa-se que embora a incorporação do SiC tenha apresentado limitações, a presença do reforço é visível nas micrografias obtidas. No entanto, é importante salientar que a quantidade efetivamente incorporada parece estar abaixo

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

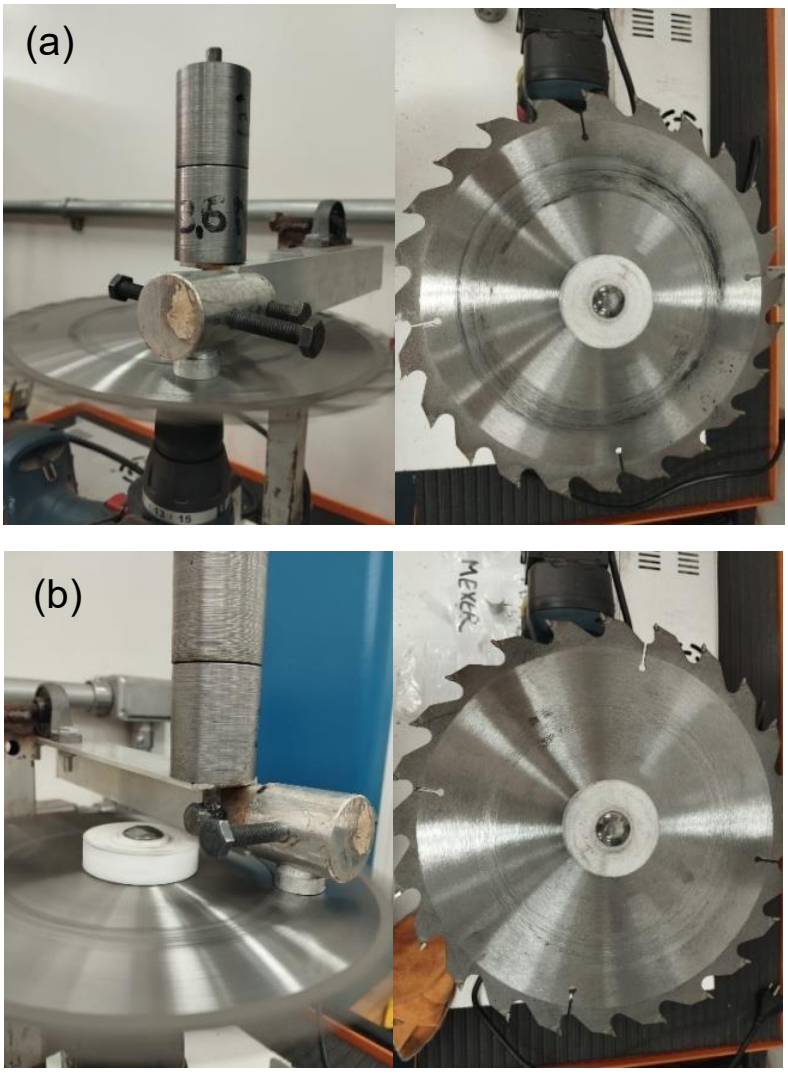
da proporção teórica inicialmente prevista, evidenciada pela significativa quantidade de pó remanescente no cadinho após o vazamento.

4.4 ENSAIO DE DESGASTE

O ensaio de desgaste foi realizado em duas etapas: uma primeira corrida de 1000 metros seguida por uma segunda corrida de 1400 metros, totalizando 2400 metros e 50 minutos de ensaio. Antes do início e após cada pausa o material foi pesado para analisar a perda de massa.

Entre cada ensaio, o contra corpo era limpo com álcool com intuito de eliminar possíveis impurezas. Na Figura 30, observa-se a realização do ensaio para cada uma das amostras e seu respectivo rastro de desgaste deixado disco.

Figura 30 - Realização do ensaio de desgaste em cada amostra (a) ensaio AA6061 (b) ensaio AA6061 5% SiC (c) ensaio AA6061 15% SiC

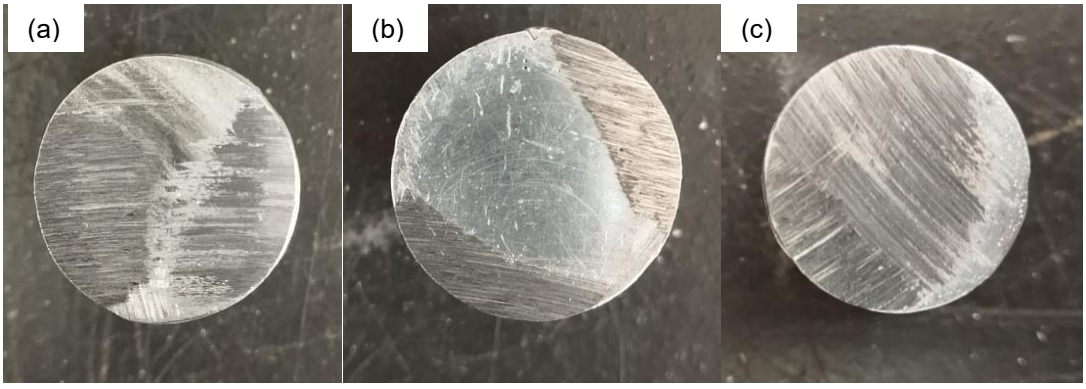


Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Fonte: Autor (2025)

Após a realização de cada ensaio, registrou-se a macroestrutura da superfície das amostras, conforme apresentado na Figura 26. No caso da amostra com 5% de SiC, foram identificadas dificuldades em fixá-la adequadamente, de modo a garantir um contato uniforme com o disco de contraprova. Esse problema pode ser observado nas Figuras 30(b) e 31(b), onde se destaca a falta de contato em uma dada região da amostra e se evidencia um desgaste desuniforme na superfície. Essa irregularidade de contato pode ter influenciado diretamente nos resultados obtidos quanto à perda de massa da amostra.

Figura 31 - Macroestrutura das amostras após o ensaio de desgaste (a) AA6061, (b) AA6061 5%, (c) AA6061 15% SiC



Fonte: Autor (2025)

Com as pesagens realizadas antes do início, durante a pausa e ao final do ensaio, foi possível obter os valores de perda de massa para cada amostra. Esses dados permitiram a construção da Tabela 8 e o Gráfico 2 com os valores absolutos e percentuais de perda de massa.

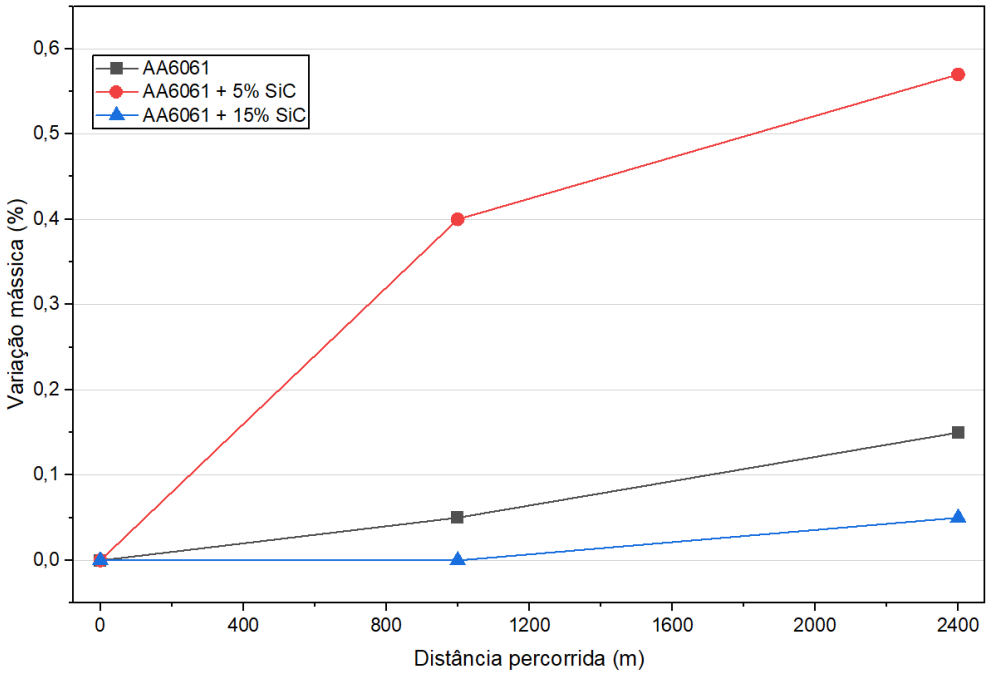
Tabela 8 - Perda de massa pela distância percorrida com diferentes teores de reforço no ensaio de desgaste

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Distância (m)	AA6061		AA6061 + 5% SiC		AA6061 + 15% SiC	
	Massa (g)	Variação mássica (%)	Massa (g)	Variação mássica (%)	Massa (g)	Variação mássica (%)
0	20,61	0	17,76	0	19,50	0
1000	20,60	0,05	17,69	0,40	19,50	0,00
2400	20,58	0,15	17,66	0,57	19,49	0,05

Fonte: Autor (2025)

Gráfico 2 - Variação mássica pela distância percorrida com diferentes teores de reforço no ensaio de desgaste.



Fonte: Autor (2025)

Com base nos dados obtidos, observou-se que o compósito contendo 5% de SiC apresentou comportamento divergente do esperado, o que pode ser justificado pelas intercorrências já discutidas anteriormente. Por outro lado, ao analisar a liga de alumínio pura e o compósito com adição de 15% de reforço, verificou-se uma redução na perda de massa com o aumento da fração de SiC, indicando uma melhora na resistência ao desgaste.

Segundo Bhat e Kakandikar (2019) a taxa de desgaste pode ser determinada com base na quantidade de massa perdida em relação à distância percorrida, conforme a equação:

$$Wr = variação\ de\ massa\ (kg) \div distância\ percorrida\ (m) \quad (6)$$

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

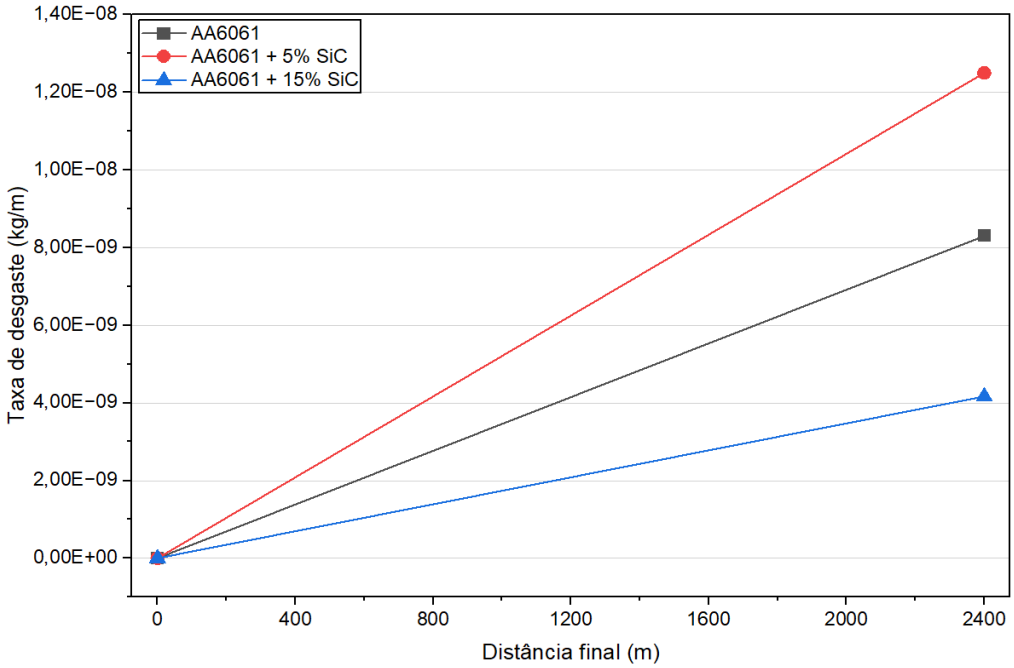
Com base nessa equação, é possível construir uma tabela de resultados da taxa de desgaste em função das variáveis analisadas.

Tabela 9 - Taxa de desgaste pela distância percorrida com diferentes teores de reforço no ensaio de desgaste

Distância (m)	AA6061	AA6061 + 5% SiC	AA6061 + 15% SiC
	Wr (kg/m)	Wr (kg/m)	Wr (kg/m)
0	0	0	0
1000	1E-08	7E-08	0
2400	8,3E-09	1,25E-08	4,17E-09

Fonte: Autor (2025)

Gráfico 3 - Taxa de desgaste pela distância final.



Fonte: Autor (2025)

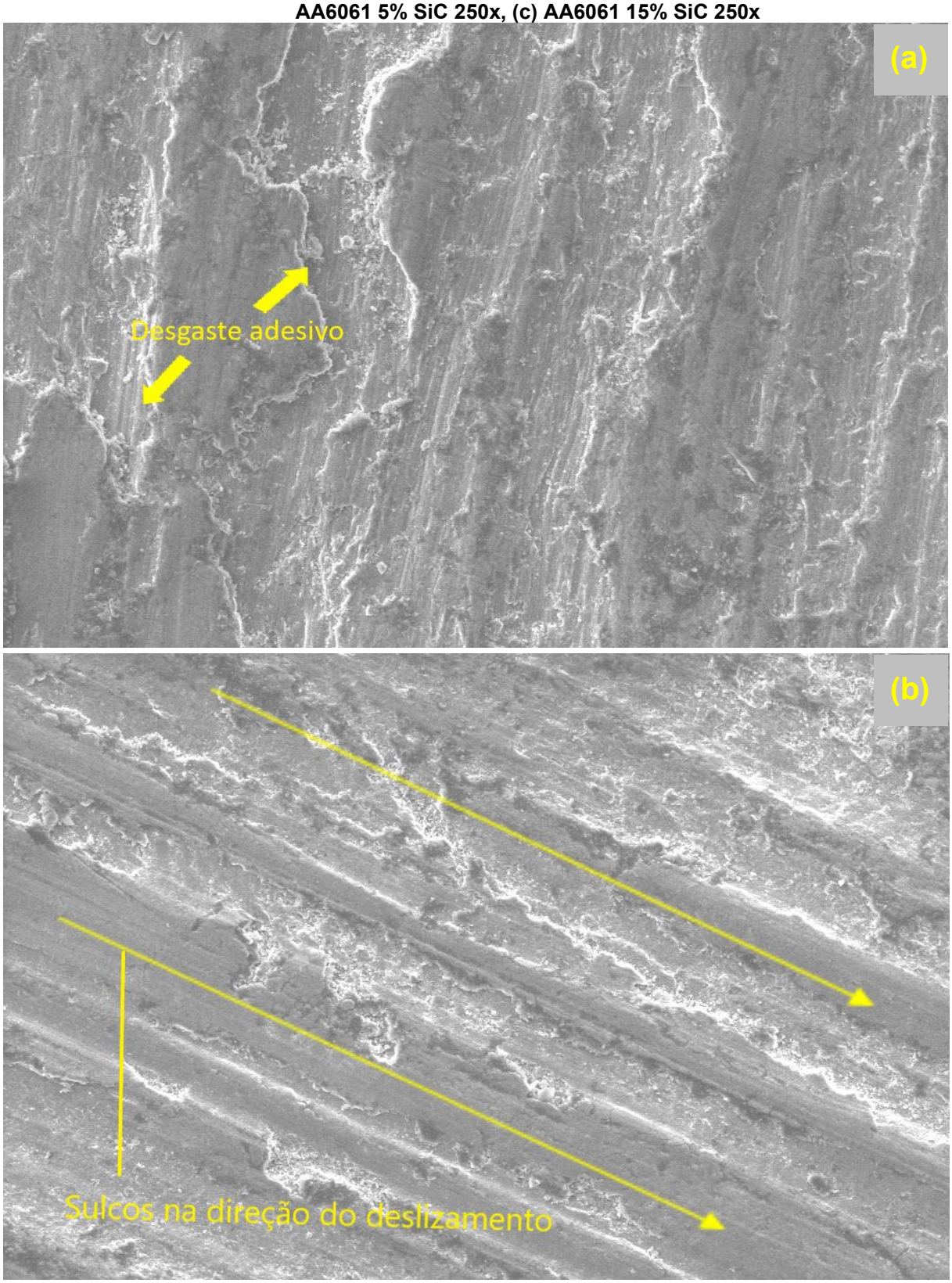
Em sua pesquisa, Bhat e Kakandikar (2019) compararam o desempenho da liga de alumínio AA6061 com o da liga AA6061 reforçada com 5% de SiC, sob diferentes condições de carga e velocidade. Os resultados indicaram que a fração de reforço teve um impacto mais significativo sobre a resistência ao desgaste do que os fatores operacionais. Além disso, os mecanismos de desgaste foram diferentes entre os dois materiais, tendo a liga sem reforço apresentado um desgaste adesivo enquanto o compósito com SiC apresentou desgaste predominantemente abrasivo.

Analisando a microestrutura da superfície de desgaste, a Figura 32 apresenta a morfologia da superfície desgastada de cada amostra. Por meio dessas

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

imagens, é possível observar as características resultantes do mecanismo de desgaste atuante.

Figura 32 - MEV da superfície das amostras depois do ensaio de desgaste (a) AA6061 250x, (b) AA6061 5% SiC 250x, (c) AA6061 15% SiC 250x



Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Fonte: Autor (2025)

Ahn e Ochiai (2002), em seu estudo, observaram o mecanismo de desgaste em ligas AA6061. A superfície desgastada assemelha-se com a deste trabalho. Conforme a Figura 9, é possível observar o desgaste adesivo em amostras sem reforço da liga e a mudança do mecanismo para abrasivo quando o reforço é adicionado.

É possível observar na Figura 32 (a) o mecanismo de desgaste adesivo com zonas de contornos irregulares e esbranquiçadas. Esse tipo de desgaste é comum em materiais dúcteis como a liga metálica AA6061. Pode-se observar que o material foi descolado da amostra e provavelmente aderiu à superfície do disco devido à ligação localizada na superfície de contato entre a amostra e o material do contra corpo, resultante do aumento da temperatura do ambiente de desgaste e do aquecimento por atrito (BHAT e KAKANDIKAR, 2019).

Mishra e Srivastava (2016) investigaram compósitos de alumínio reforçados com carbeto de silício (SiC) variando a fração em peso de 5% a 40% e granulometria do reforço. Os resultados experimentais mostraram que à medida que a porcentagem de SiC aumentava, ocorria uma redução significativa na taxa de desgaste.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

Ainda os autores, em suas análises por MEV da superfície de desgaste na Figura 10, observaram predominantemente um mecanismo de desgaste abrasivo, que confirma a presença de partículas duras na matriz metálica e que o aumento do teor de reforço promove maior resistência ao desgaste, devido à ação de barreira mecânica das partículas de SiC que dificultam a deformação plástica e o desgaste adesivo. O que irá corroborar com as imagens de MEV do presente estudo.

A inclusão de partículas de SiC na matriz aumenta a resistência ao desgaste por deslizamento em comparação com a liga pura não reforçada. Esse aprimoramento se explica por três fatores principais: as partículas cerâmicas duras elevam a dureza do compósito, contribuindo diretamente para a melhoria da resistência ao desgaste; há ligação interfacial entre a liga matriz e as partículas de reforço, que possibilitam uma transferência eficaz de carga; e o desajuste térmico entre a matriz e as partículas de SiC aumenta a densidade de discordâncias, o que resiste à deformação plástica do material durante o deslizamento, reduzindo assim o desgaste (MOHANAVEL et al., 2018).

Com adição do reforço cerâmico, observa-se o mecanismo de desgaste abrasivo, como apontado na Figura 32 (b) e (c), que apresentam ligas reforçadas com SiC. No caso do compósito com 5% de SiC o desgaste é mais acentuado e os sulcos mais profundos, o que pode ser relacionado a uma má distribuição de carga durante o ensaio, além da dificuldade de fixação da amostra no equipamento desenvolvido, que não é padronizado.

Por outro lado, a Figura 32 (c) correspondente ao compósito com 15% de SiC, mostra uma baixa presença de sulcos, restritas a regiões pontuais. A superfície apresenta mais pontos de ranhuras, demonstrando uma melhora significativa na resistência ao desgaste do compósito. O que é esperado devido à presença das partículas de SiC que atuam como obstáculos à deformação plástica, aumentando a resistência ao desgaste e a dureza do material (EL-GARHY et al., 2021).

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo produzir compósitos de alumínio AA6061 reforçados com diferentes porcentagens de carbeto de silício (SiC) por meio do método de fundição com agitação manual (stir casting adaptado) e analisar o comportamento desses materiais quanto ao desgaste.

Os compósitos foram efetivamente produzidos, demonstrando a viabilidade da técnica para incorporar o reforço na matriz metálica, apesar das dificuldades encontradas na homogeneização do SiC. A influência da adição do SiC no alumínio foi observada principalmente na resistência ao desgaste, onde a fração de 15% de SiC proporcionou um desempenho superior, com menor perda de massa e redução dos sulcos causados pelo desgaste abrasivo, indicando que a quantidade do reforço é fundamental para formar uma barreira mecânica eficaz.

A análise morfológica da superfície evidenciou a presença do SiC na microestrutura, o que ajudou a compreender os mecanismos de desgaste envolvidos. A liga AA6061 sem reforço apresentou desgaste predominantemente adesivo, enquanto a adição de 5% de SiC causou mudança para um desgaste abrasivo, porém com desgaste irregular devido ao contato insuficiente durante o ensaio.

Por fim, conclui-se que a adição de SiC, especialmente em 15%, aumenta a resistência ao desgaste do alumínio AA6061, potencializando sua aplicação em componentes sujeitos a condições severas de desgaste, como sistemas de freio e elementos de transmissão.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aprimorar os resultados, recomenda-se o uso de métodos de agitação mais eficientes e a otimização do pré-tratamento do SiC, a fim de melhorar sua distribuição e molhabilidade na matriz. Tempos maiores de ensaio são indicados para resultados mais expressivos.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

REFERÊNCIAS

ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. Publicação Técnica - **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**, ABAL, P.22, 2007.

ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. **Cadeia Primária.** Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria>. Acesso em: 05 de agosto de 2023.

AHN, J.J.; OCHIAI, S. Wear behaviour and friction property of SiC/Al composites at elevated wear environment temperature. **International Innovation Center**, Kyoto University, Sakyo, Kyoto, 606–8501, 2002.

ANNIGERI, U.K.; VEERESH KUMAR, G.B. Method of stir casting of aluminum metal matrix composites: A review. Mater. Today proc. v. 4, p.1140–1146, 2017.

ARSENAULT, R.J.; PANDE, C.S. Interfaces in metal matrix composites. **Scripta metallurgica.** V. 18, n. 10, p.1131-1134, 1984.

ASM. **Aerospace Specification Metals**, Inc. 2891 N.W. 22 Terrace Pompano Beach, FL 33069

ASM HANDBOOK. **Heat Treating of Aluminum Alloys. ASM International.** 1991; 4: 1862–1960.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK. **Properties and selection: nonferrous alloys and purpose material**. 9ª ed. Metals park. v. 2, 1990

ASTM G40: **Standard terminology relating to wear and erosion**. West Conshohocken, 2015.

BAINS, P.S.; SIDHU, S.S.; PAYAL, H.S. **Fabrication and machining of metal matrix composites**: A review. Mater Manuf Process, 2016.

BARBOSA, C. **Metais não ferrosos e suas ligas: microestrutura, propriedades e aplicações**. Rio de janeiro, 2014.

BELÉM, M.J.X. et al. Avaliação da resistência ao desgaste erosivo e abrasivo de revestimentos wc 12co aplicados por aspersão térmica hvof. **Revista matéria**, Rio De Janeiro - RJ, v. 25, n. 1, p. 1 - 13, 6 abr. 2020.

BENEDYK, J.C. **Ligas de alumínio para estruturas automotivas leves, Projeto e fabricação de materiais para veículos leves.** Elsevier, 79-113. 2010.

BHAT, A.; KAKANDIKAR, G. Manufacture of silicon carbide reinforced aluminium 6061 metal matrix composites for enhanced sliding wear properties. **School of mechanical engineering**, Karad Mit World Peace University, Pune, India. 2019.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

BHUSHAN, B. **Principles and applications of tribology**. 2ª ed. Published by wiley &sons. Inc. Hoboken, New Jersey, 2013.

BUDINSKI, K.G. **Surface engineering for wear resistance. (Retroactive coverage)**. Prentice-hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.

BRAGA, S. L. S. **Análise do comportamento térmico do forno acheson e da sua camada de mistura isolante.** São João Del Rei, 2011. 94p. Trabalho de pós-graduação. Universidade Federal De São João Del Rei.

CALÇADA, M. V. **Avaliação mecânica e microestrutural da liga de alumínio aa3104 empregada na indústria de fabricação de latas laminada à frio com e sem interpasses**. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista - Unesp, Guaratinguetá, São Paulo, 2018.

CALDAS, E. S. **Caracterização química e microestrutural de alumínio reciclado de embalagem pós consumo de bebidas**. Trabalho De Conclusão De Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Do Pará – UFPA, Ananindeua, Pará, 2019.

CALLISTER, W. D. Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais, 8ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2012.

CHAK, V.; CHATTOPADHYAY, H.; DORA, T. L. A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites. **Journal of manufacturing processes**, v. 56, p. 1059–1074, 2020.

CHATTOPADHYAY, A. K. et al. Wettability and machinability study of pure aluminium towards uncoated and coated carbide cutting tool inserts. **Surface and coatings technology**, v. 203, n. 8, p. 941–951, 2009.

CHIEW, Y. L.; CHEONG, K. Y. Synthesis of sic nanostructures through chemical vapor growth route. **Material wissenschaft und werkstofftechnik**, [s.l.], v. 43, n. 5, p.412-415, 2012.

DAS, B.; ROY, S.; RAI, R.N.; SAHA, S.C.; MAJUMDER, P. Effect of in-situ processing parameters on microstructure and mechanicalproperties of tic particulate reinforced al—4. 5cu alloy mmc fabricated by stir-casting technique—optimization using greybased differential evolution algorithm. **Measurement** v**.** 93, p. 397–408, 2016.

DAVIS, JR. **Alloying: Understanding the basics**. Ohio: Asm International, 2001.

DIAS, P. B. **Desenvolvimento de compósito particulado porcelanato/epóxi para revestimento anti-erosivo em dutos**. Campos dos Goytacazes: UENF, 2007.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

DIAS, W. S. **Análise da influência do tratamento térmico na liga al-0,05%cu- [0,35-0,45]%Fe modificada com dois teores de zircônio solidificada em coquilha metálica**. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Do Pará – UFPA, 2016.

DINIZ, L. M. **Influência do tratamento térmico na vida em fadiga de fios de alumínio**. Dissertação (Mestrado Em Ciências Mecânicas) – Universidade De Brasília, Brasília – DF, 2018.

EL-GARHY, G.; EL MAHALLAWY, N.; SHOUKRY, M.K. **Effect of grain refining by cyclic extrusion compression (CEC) of Al-6061 and Al-6061/SiC on wear behavior.** Journal of Materials Research and Technology. v. 12, p. 1886–1897, 2021.

FATHY, A. ABU-OGAIL, A. Improved mechanical and wear properties of hybrid al-al2o3/gnps electro-less coated ni nanocomposite. **Ceramics international**. v.44, n.18, 2018.

GARG, P.; JAMWAL, A.; KUMAR, D.; SADASIVUNI, K.K.; HUSSAIN, C.M.; GUPTA, P. Advance research progresses in aluminium matrixcomposites: manufacturing & applications. **J. Mater. Res. Technol.** v.8, p.4924–4939, 2019.

GIREESH, C.H. et al. Mechanical characterization of aluminium metal matrix composite reinforced with aloe vera powder. **Materials today: proceedings**, v.5, n. 2, p.3289-3297, 2018.

GODOY, A.L.E., **Estudo da influência da adição de polímeros precursores cerâmicos na sinterização de SiC e Al2O3**. IPEN, São Paulo, 2005.

Govbr. **Disponível em**: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/4-1-aluminio>. Acesso em: 10 de agosto de 2023.

HARICHANDRAN R.; SELVAKUMAR, N. Microstructure and mechanical characterization of (b4cþ h-bn)/al hybrid nanocomposites processed by ultrasound assisted casting. **Int j mech sci,** 2018.

HERNANDEZ, F. C. R.; RAMÍREZ, J. M. H.; MACKAY, R. **Al-si alloys**: Automotive, aeronautical, and aerospace applications. 1. Ed. Cham: springer, 2017.

HOZER, L.; LEE, J-R; CHIANG, Y-M. **Reaction-infiltrated, net-shape SiC Composites.** Materials Science Engineering, A195, pp. 131-143, 1995.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. 2. Ed. Reino unido: 2017. 388 p.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

JAMAATI, R.; NASERI, M.; TOROGHINEJAD, M. R. Wear behavior of nanostructures al/al2o3 composite fabricated via accumulative roll bonding (arb) process. **Materials and design**, v. 59, p. 540-549, 2014.

JAMES, S. J., ANNAMALAI, A. R. (2018). **Machinability Study of Developed Composite AA6061-ZrO2 and Analysis of Influence of MQL**. Metals, 8(7), 472.

JIA, D.; LIANG, B.; YANG, Z.; ZHOU, Y. Metastable si-b-c-n ceramics and their matrix composites developed by inorganic route based on mechanical alloying: fabrication, microstructures, properties and their relevant basic scientific issues. **Progress in materials science**, [s.l.], v. 98, p.1-67, out. 2018.

KADAM, M.S.; SHINDE, V.D. Stir cast aluminium metal matrix composites with mechanical and micro-structural behavior: A review.mater. **Today proc**. **v.** 27, p.845–852, 2020.

KAINER, K. U. Basics of metal matrix composites. In: _____. **Metal matrix composites**: custom-made materials for automotive and aerospace engineering. Weinheim: wiley-vgh verlag gmbh & co. Cap.1, p.1-54, 2006.

KARADEMIR, I.; UNA, O.; ATES, S.; GOKCE, H.; GOK, M.S. Effect of severe plastic deformation on wear properties of aluminum matrix composites. **Acta phys pol**, v.131, n.3, 2017.

KAREEM, A.; QUDEIRI, J.A.; ABDUDEEN, A.; AHAMMED, T.; ZIOUT, A. A review on aa 6061 metalmatrix composites produced by stir casting. **Materials** v.14, p.175, 2021.

KUMAR, N. M.; KUMARASWAMIDHAS, I. A. Characterization and tribological analysis on aa 6061 reinforced with aln and zrb2 in situ composites. **Journal of materials research and technology**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.969-980, jul. 2018.

KUMARASWAMY, H.S.; BHARAT, V.; KRISHNA RAO, T. Influence of mechanical & tribological behaviourof al 2024 mmc fabricated by stir casting technique: A review. **Mater. Today proc**. v. 5, p.11962–11970, 2018.

LAKSHMI, S. Fabrication and testing of aluminium 6061 alloy & silicon carbide metal matrix composites. **International research journal of engineering and and technology**. v.4, 2017.

LESZEK, H.; JONQ-REN, L.; YET-MING, C. Reaction-infiltrated, net-shape sic composites. **Materials science engineering**, p. 131-143, 1995.

LI, M. et al. Synthesis and mechanical behavior of nanostructured al 5083/n-tib2 metal matrix composites. **Mater sci enga**, 2016.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

MARTINEZ, J. C. C. M. **Avaliação da resistência ao desgaste à corrosão de moedas revestidas de cobre e bronze.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal Do Rio De Janeiro - Rio de janeiro, 2004.

MAZAHERY, A.; ABDIZADEH, H.; BAHARVANDI, H.R. Development of highperformance a356/nano-al2o3 composites. **Materials science and engineering** v.518, p. 61-64, 2009.

MISHRA, A.K.; SRIVASTAVA, R.K. **Wear behaviour of al-6061/sic metal matrix composites**. The institution of engineers, 2016.

MOGHADAM, A. D; OMRANI, E.; MENEZES, P. L.; ROHATGI, P. K. **Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene – A review.** Composites Part B, Vol. 77, pp. 402-420.

MOHANAVEL, V.; ALI, K. S. A.; PRASATH, S.; SATHISH, T.; RAVICHANDRAN, M. **Microstructural and tribological characteristics of AA6351/Si_3N_4 composites manufactured by stir casting.** *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 6, p. 14662-14672, nov./dez. 2020.

MOHANAVEL, V.; RAJAN, K.; KUMAR, S. S.; CHOCKALINGAM, A.; ROY, A.; ADITHIYA, T. **Mechanical and tribological characterization of stir-cast Al–SiCp_pp composites.** Materials Today: Proceedings, v. 5, p. 1740–1746, 2018.

MOSES, J.J.; DINAHARAN, I.; SEKHAR, S.J. characterization of silicon carbide particulate reinforced aa6061 aluminum alloy composites produced via stir casting. **Procedia mater sci**. v.5, p.106–112, 2014.

MUKHOPADHYAY, P. Alloy designation, processing, and use of aa6xxx series aluminium alloys. **Isrn metall**. 2012.

MURTHY, H. N. et al. Mechanical and tribological behavior of silicon carbide particulate reinforced AA6351 composites manufactured by liquid metallurgy process. Materials Today: **Proceedings,** [S. l.], v. 4, n. 2, p. 3182–3190, 2017.

NAHER, S.; BRABAZON, D.; LOONEY, l. Development and assessment of a new quick quench stir caster design for the production of metal matrix composites. **Journal of materials processing technology**, v.166, p.430-439, 2004.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais**. Edgard blucher, São Paulo - SP, 243p.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

OLIVEIRA, J. **Caracterização fratográfica de compósito de matriz metálica submetido a ensaios de impacto, flexão e fadiga**. Dissertação (Mestrado) – Escola De Engenharia De São Carlos, Universidade De São Paulo, São Carlos, 2013.

PEREIRA, Gualter. S. **Manufatura e caracterização de compósito de matriz de alumínio reforçado com partículas de carbeto de silício, obtido por laminação acumulativa**. Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Tarpani. 2017. 98 f. Disertación (De Maestría) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2016.

RAHMAN, M. H.; AL RASHED, H. M. M. Characterization of silicon carbide reinforced aluminum matrix composites. **Procedia engineering**, v. 90, p. 103–109, 2014.

RAMADOSS, N.; PAZHANIVEL, K.; ANBUCHEZHIYAN, G. Synthesis of b4c and bn reinforced al7075 hybrid composites using stir casting method. **J mater res technol**, 2020.

REIS, I. N. S. F. **Influência da granulometria nas propriedades reológicas da polpa de bauxita pós beneficiamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal Do Pará – UFPA, Belém, Pará, 2015.

SANTANA, J. G. A. **Desenvolvimento de cerâmicas multicamadas de carbeto de silíciodestinadas a aplicações térmicas**. Guaratinguetá, 2010. 202p. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Faculdade De Engenharia do Campus De Guaratinguetá.

SARAVANAKUMAR, A.; SIVALINGAM, S.; KUMAR, L.R. Dry sliding wear of aa2219/gr metal matrix composites. **Mater today proc**. v.5, n.2, 2018.

SCHNEIDER, G. et al. Phase equilibria in the system al4c3-be2c-sic. **Journal of the american ceramic society**, v. 62, n. 11-12, p.574-576, nov. 1979.

SIJO, M. T.; JAYADEVAN, K. R. Analysis of stir cast aluminium silicon carbide metal matrix composite: a comprehensive review. **Procedia technology**, v. 24, p. 379– 385, 2016.

SILVA, R. P. **Estudo do processamento e da microestrutura de carbeto de silício ligado por reação.** Rio de janeiro, 2009. 69 p. Universidade federal do Rio De Janeiro.

SINGH, S.; SINGH, I.; DVIVEDI, A.; DAVIM, J.P. Sicp-reinforced al6063 mmcs: mechanical behavior and microstructural analysis. In: **international conference on research and innovations in mechanical engineering**, 2014, ludhiana/india. Proceedings. ed. Springer india, vol. 1, pp. 451-464, 2014.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

SINGH, B.; LAL, H.; SINGH, G.; SINGH, P. **Effect on properties of aluminum by adding alumina slag as a strengthener", International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research.** Vol. 2, No. 3, pp. 96-100, 2013.

SHARMA, A.K.; BHANDARI, R.; AHERWAR, A.; RIMASAUSKIENE, R. Matrix materials used in composites: a comprehensive study, **mater**. Today: p.1559–1562, 2020

SHREVE, R.N. **shreve's chemical process industries**. New york: mcgraw-hill, 1984.

SORLIE, M.; OYE, H. A. **Cathodes in aluminium electrolysis**. Dusseldorf. Germany: aluminium-verlag publisheres, 1989.

SOUZA, N. C. O.; LIMA, P. L. **Estudo comparativo entre a fabricação de latas de alumínio a partir do alumínio primário e do alumínio reciclado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Do Vale Do Paraíba, São José Dos Campos, São Paulo, 2015.

TICHY, J. A., MEYER, D. M. Review of solid mechanics in tribology. **International journal of solids and structures**, v. 37, 2018.

TREVISAN, D. C. N. **Análise do comportamento do desgaste em um sistema pino-disco através de ensaios experimentais combinada com avaliação de pressão de contaro por meio de simulação numérica** – 2013. 124f., Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2013.

USI BRONZE: ligas de aço e metais. **Disponível em** <https://usibronze.com.br/2018/12/18/saiba-as-especificacoes-da-abnt-para-a-regularizacao-do-aluminio-comercializado/> acesso em 03 de abril de 2025.

VANGER, Sofia H. **Silicon Carbide: New Materials, Production Methods and Applications.** New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. 247 p.

PEREIRA, G. S. **Manufatura e caracterização de compósito de matriz de alumínio reforçado com partículas de carbeto de silício, obtido por laminação acumulativa**. 2017. 98 f. Escola De Engenharia De São Carlos, São Carlos, 2016.

WARD-CLOSE, C. M.; CHANDRASEKARAN, L.; ROBERSON, J. G.; GODFREY, S. P.; MURGATROYDE, D. P. Advanced in fabrication of titanium metal matriz composite: **Materials Science e Engineering**. V. 263, pp. 314-318,1999.

WANG, Z.; SONG, M.; SUN C.; HE, Y. Efeitos do tamanho e distribuição de partículas nas propriedades mecânicas de compósitos de liga Al-Cu reforçados com sic. Mater. Sci. **Eng. A.** v. 528, p.1131–1137. 2010.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46

ZHANG, Y. LIU, Y. WANG, J. HU, D. LI, J. **Microstructure and wear resistance of direct laser-deposited tic-enhanced aluminum-based composite coating for brake discs,** surf. Coating. Technol, 2023.

ZUM GAHR, K. L. **Microstructure and wear of materials**. V. 10 ed. [s.1.], 1987.

Versão Final Homologada
27/08/2025 13:46