



Serviço Público Federal
Universidade Federal do Pará
Campus Universitário de Ananindeua
Faculdade de Engenharia de Materiais - FEMat

LUIS FELIPE ALENCAR BRANDÃO

**ESTUDO DE UM COMPÓSITO DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMÍNIO COM
PARTICULADOS DE CARBETO DE SILÍCIO**

Ananindeua, PA
2019

LUIS FELIPE ALENCAR BRANDÃO

**ESTUDO DE UM COMPÓSITO DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMÍNIO COM
PARTICULADOS DE CARBETO DE SILÍCIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais, Faculdade de
Engenharia de Materiais, Campus Universitário
de Ananindeua, Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa.

Ananindeua, PA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema
de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

B817e Brandão, Luis Felipe Alencar
ESTUDO DE UM COMPÓSITO DE MATRIZ METÁLICA DE
ALUMÍNIO COM PARTICULADOS DE CARBETO DE
SILÍCIO / Luis Felipe Alencar Brandão. — 2019. xiv,
58 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de
Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Ananindeua,
Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

1. Compósito de Matriz Metálica. 2. Carbetos de
Silício. 3. Agitação Manual. I. Título.

CDD 620.1

LUIS FELIPE ALENCAR BRANDÃO

**ESTUDO DE UM COMPÓSITO DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMÍNIO COM
PARTICULADOS DE CARBETO DE SILÍCIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de
Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do
Pará, como requisito para obtenção do Bacharelado em Engenharia de Materiais.

Data da Aprovação: : 06/12/2019

Conceito: Excelente

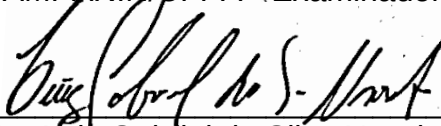
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
(FEMat/CAMPANIN/UFPA – Orientador)



Prof. Me. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro
(FEMat/CAMPANIN/UFPA - Examinador Interno)



Prof. Dr. Luiz Gabriel da Silva Nascimento
(IFPA/Belém - Examinador Externo)

Aos meus avós, Francisca Maria e José
Alencar de Oliveira.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, desejo enfatizar que apesar de muitos estarem mencionados aqui, devo agradecer a todos os envolvidos na realização deste trabalho, a todos vocês, o meu muito obrigado.

Posteriormente agradeço a minha família, em especial minha mãe, Fernanda, e minha irmã, Daniele, e aos meus tios e quase irmãos e irmãs Kássia, Renata, Marcus e Ricardo por todo o apoio para a conclusão da minha graduação.

Agradeço também a minha namorada Camila, que amo muito, e toda sua família pelo suporte que me deram durante todo este tempo.

Aos membros do GPEMAT, mais especificamente, devo agradecer a Clóvis, Emerson, Patrick, e a todos os outros membros do laboratório de metalografia e tratamento térmico, no laboratório de Engenharia Mecânica na UFPA.

Aos colegas de LAMPS, localizado no laboratório de Engenharia Química, na UFPA, em especial Alice, Aline, Darllan e Clerys.

A professora Raimunda Maia, por conta dos seus ensinamentos para as caracterizações e preparo de amostras.

Aos técnicos e docentes da Faculdade de Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará.

Aos meus amigos e amigas de graduação, em especial ao grupo de discussão FACTH, que me apoiaram e animaram durante o curso.

Aos professores e professoras que contribuíram intelectualmente para a minha formação como futuro engenheiro de materiais.

A Universidade Federal do Pará e ao Campus Universitário de Ananindeua, por proporcionar a experiência de ser universitário.

E por fim, ao meu professor e orientador, Deibson, por me apresentar um jeito de fazer ciência, com bom humor e fé que eu faria um bom trabalho.

“Embora todos os homens sejam feitos do mesmo metal, mas não são todos fundidos no mesmo molde.”

Thomas Fuller

RESUMO

Neste trabalho, objetivou-se estudar a interação do Carbetto de Silício e do Alumínio em um compósito metálico de fabricação por agitação manual. Foram confeccionados corpos de prova sem a presença do Carbetto de Silício, com a justificativa de ser objeto de comparação em relação ao compósito proposto. A incorporação do pó de carbetto de silício foi a partir de 5 % em massa de carbetto de silício, por agitação manual. Após isto, houve o seccionamento, conformação e preparo para realizarem-se as caracterizações de propriedades como resistência à tração, resistividade elétrica, microdureza, metalografia por microscopia ótica e por meio de microscopia eletrônica de varredura, e caracterizações químicas via espectroscopia de raios x por dispersão em energia e fluorescência de raios x, e por fim uma determinação qualitativa do percentual de reforço incorporado na matriz. Por meio de ensaios metalográficos e mecânicos foi caracterizado o comportamento macroestrutural, microestrutural e as propriedades mecânicas. O acréscimo de aproximadamente 0,5 %, de carbetto de silício aumentou significativamente a resistência mecânica no que tange à tração no compósito em relação a matriz pura. Quanto a condutância elétrica, foi notado uma redução de cerca de 7 % IACS. A partir das análises, foi estimada uma incorporação de 0,5 % de carbetto de silício pelo método de agitação manual.

Palavras-chave: Compósito de Matriz Metálica. Carbetto de Silício. Agitação Manual.

ABSTRACT

In this work, the objective was to study the interaction of Silicon Carbide and Aluminum in a metallic composite of manual agitation manufacturing. Specimens were made without the presence of Silicon Carbide, with the justification of being the object of comparison in relation to the proposed composite. The incorporation of silicon carbide powder was from 5% mass silicon carbide, by manual agitation. After this, there was sectionation, conformation and preparation to perform the characterizations of properties such as tensile strength, electrical resistivity, microhardness, optical microscopy metalography and by means of electronic microscopy of scanning, and chemical characterizations via x-ray spectroscopy by dispersion in energy and x-ray fluorescence, and finally a qualitative determination of the percentage of reinforcement incorporated into the matrix. By metallographic and mechanical tests, macrostructural, microstructural and mechanical properties were characterized. The increase of approximately 0.5 %, silicon carbide significantly increased mechanical resistance with regard to traction in the composite in relation to the pure matrix. As for electrical conductance, a reduction of about 7 % IACS was noted. From the analyses, an incorporation of 0.5% of silicon carbide was estimated by the manual agitation method.

Palavras-chave: Metallic Matrix Composite. Silicon Carbide. Manual Stir.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Torneamento.....	22
Figura 2 - Processos de Laminação.....	23
Figura 3 - Processo/Célula de eletrólise da alumina.	25
Figura 4 - Classificações dos Materiais Compósitos.	28
Figura 5 - Esquematização dos materiais e métodos de fabricação do compósito com a resistência do material.	31
Figura 6 - Fluxograma sobre a realização do trabalho.	32
Figura 7 - Cadinho (a) e Molde (b).	33
Figura 8 - Carbetto de Silício (a) e Peneira de 75 microns (b).	33
Figura 9 - Fluxograma para a fundição e preparo das amostras.....	34
Figura 10 - Lingote seccionado de Alumínio Eletrocondutor (a), e forno mufla (b).	34
Figura 11 - Gás Argônio.	35
Figura 12 - Peça usinada.	36
Figura 13 - Laminador elétrico duo reversíveis da marca MENAC.	36
Figura 14 - Fio laminado em 3 mm de diâmetro.....	37
Figura 15 - Peças embutidas em Poliéster Isoftálico.	37
Figura 16 - Rigaku Miniflex 600.....	38
Figura 17 - Politriz.	39
Figura 18 - Microscópio Nikon LV-UEPI.....	39
Figura 19 - Material de apoio utilizado para ataque de com ácido fluorídrico 0,5 %.	40
Figura 20 - Microscópio Hitachi TM 3000.....	40
Figura 21 - SwiftED3000.	41
Figura 22 - Fluxograma da Lixiviação Ácida	42
Figura 23 - Experimento de lixiviação ácida.....	42
Figura 24 - Sistema para a filtração simples	43
Figura 25 - Dissecador acoplado à bomba a vácuo (a), e estufa para secagem (b).	43
Figura 26 - Medição em picnômetro (a), e em proveta, (b).	44
Figura 27 - Multiohmímetro montado para o ensaio.....	45
Figura 28 - Ensaio de Microdureza em execução.	46

Figura 29 - Esquema de indentações.....	46
Figura 30 - Corpo de Prova do Ensaio de Tração.....	46
Figura 31 - KRATOS, no laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA.	47
Figura 32 - Máquina de Ensaio Universais AROTEC WDW- 100E, no IFPA.	47
Figura 33 - Fundição do compósito.....	48
Figura 34 - Difratoograma do Pó de Carbetto de Silício.....	49
Figura 35 - Macroestruturas da matriz (a), e do compósito (b).	50
Figura 36 - Alumínio matriz com ampliação de 100 x.	51
Figura 37 - Compósito com ampliação de 100 x.	52
Figura 38 - Compósito em ampliação de 500 x em 2 posições focais, no plano (a), e acima do plano (b).....	52
Figura 39 - Matriz com magnificação de 250 x (a), e com elementos destacados em (b).....	53
Figura 40 - Matriz com magnificação de 3000 x.....	54
Figura 41 - Micrografia do compósito com magnificação de 100 x (a), e com elementos destacados em (b).	55
Figura 42 - Micrografia do compósito com ampliação de 3000 x (a), e elementos destacados em (b).....	55
Figura 43 - Ponto utilizado para o EDS realizado em uma partícula.....	57
Figura 44 - Gráfico gerado via EDS em uma partícula.....	57
Figura 45 - Ponto da possível matriz do compósito analisado no EDS.....	58
Figura 46 - Gráfico obtido por EDS da possível matriz do compósito.	58
Figura 47 - Ataque ácido no alumínio.....	59
Figura 48 - Tubos de ensaio após 24 h em contato com a solução.	60
Figura 49 - Ensaio de resistência à tração no alumínio (a), e peça rompida (b).	65
Figura 50 - Ensaio de resistência à tração no compósito (a), e peça rompida (b). .	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características típicas do Alumínio e outros metais.....	26
Quadro 2 - Características típicas de cerâmicas.....	27
Quadro 3 - Características mecânicas de compósitos metálicos.	29
Quadro 4 - Características de Compósitos de Alumínio reforçados com carvão de silício.	30
Quadro 5 - Resultados do FRX dos Materiais.	56
Quadro 6 - EDS na possível partícula de SiC do compósito.	57
Quadro 7 - EDS na possível matriz do compósito.....	58
Quadro 8 - Perda mássica após lixiviação	61
Quadro 9 - Proporções em massa específica para os materiais.	61
Quadro 10 - Resultado da resistividade elétrica medida.	62
Quadro 11 - Medidas de microdureza para a matriz e o compósito.....	63
Quadro 12 - Resultado dos ensaios de tração.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BHN	Brinell Hardness Number (em inglês), Número de Dureza Brinell (em português).
DRX	Difratometria de Raios-X.
FRX	Flourescência de Raios-X.
GPEMAT	Grupo de Pesquisa em Engenharia dos Materiais.
IACS	International Annealed Copper Standard.
IFPA	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
LAMPS	Laboratório de Materiais Porosos Sintetizados.
NBR	Norma Brasileira.
UFPA	Universidade Federal do Pará.
VHN	Vickers Hardness Number (em inglês), Número de Dureza Vickers (em português).

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampére.
Al	Alumínio.
Al^{3+}	Íon 3+ de alumínio
Al_2O_3	Óxido de Alumínio, Alumina.
$\text{Al}(\text{OH})_3$	Gibbsita
$\text{AlO}(\text{OH})$	Diásporo ou Boehmita
BN	Nitreto de Boro
C	Carbono.
Cl_2	Gás Cloro.
cm	Centímetro.
CO	Monóxido de Carbono.
CO_2	Dióxido de Carbono.
CuCl_2	Cloreto Cúprico.
e^-	Elétron.
EC	Eletrocondutor.
FeCl_3	Cloreto Férrico
Fe^{2+}	Íon de ferro (II).
Fe^{3+}	Íon de ferro (III).
GPa	Gigapascal.
h	Hora.
HF	Ácido Fluorídrico.
HCl	Ácido Clorídrico.
H_3PO_4	Ácido Fosfórico.
kV	Quilovolt
kWh	Quilowatt hora.
M	Molar.
mg	Miligrama.
min	Minuto.
ml	Mililitro.
mm	Milímetro.
M % _(m/m)	Porcentagem mássica

MPa	Megapascal.
N	Newton.
Na_3AlF_6	Hexafluoraluminato de sódio, Criolita.
NaOH	Hidróxido de Sódio
nm	Nanômetro.
O	Oxigênio.
O^{2-}	Íon 2- de oxigênio.
P_i	Peso da amostra antes do ataque ácido.
P_f	Peso final da amostra após ataque ácido.
R_{t_0}	Resistência do condutor corrigida à temperatura especificada t_0 , em Ω .
R_t	Resistência do condutor medida a uma determinada temperatura t , em Ω .
SiC	Carbeto de Silício.
SiCnp	Nanopartículas de Carbeto de Silício.
SiCnw	Nanofios de Carbeto de Silício.
SiCp	Partículas de Carbeto de Silício.
SiCw	Whiskers de Carbeto de Silício.
t	Temperatura na qual foi efetuada a medição, em $^{\circ}\text{C}$.
t_0	Temperatura especificada, em $^{\circ}\text{C}$.
UFPA	Universidade Federal do Pará.
US\$	Dólar Americano.
α_{t_0}	Coeficiente de temperatura da resistência do condutor à temperatura t_0 , em $^{\circ}\text{C}^{-1}$.
Ω	Ohm.
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
μm	Micrômetro.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa	18
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 Síntese do Trabalho	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Metais Não Ferrosos	21
2.2 Processos de Solidificação dos Metais	21
2.3 Usinagem de Metais.....	22
2.4 Conformação Plástica de Metais	22
2.4.1 Laminação.....	22
2.5. Alumínio	23
2.5.1 Bauxita	23
2.5.2 Eletrometalurgia	25
2.5.3 Propriedades do Alumínio	26
2.6 Carbetos de Silício	27
2.6.1 Propriedades do Carbetos de Silício	27
2.7 Compósitos com Fase Partícula.....	27
2.7.1 Alumínio Reforçado com Partículas de Carbetos de Silício	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Preparo de Materiais	32
3.2 Fundição	33
3.2.1 Vazamento 1	34
3.2.2 Vazamento 2	35
3.3 Usinagem	35
3.4 Conformação	36
3.5 Embutimento	37
3.6 Caracterização Mineralógica.....	37
3.7 Caracterização Metalográfica.....	38
3.7.1 Macroestrutura	38

3.7.2 Análise de Microscopia Ótica	39
3.7.3 Microscopia Eletrônica de Varredura	40
3.8 Caracterização Química.....	41
3.8.1 Fluorescência de raios X.....	41
3.8.2 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS)	41
3.8.3 Análise por lixiviação ácida	41
3.9 Determinação da porcentagem de reforço incorporada na matriz	44
3.10 Determinação da Condutância.....	44
3.11 Caracterização Mecânica.....	45
3.11.1 Microdureza.....	45
3.11.2 Ensaio de Tração	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1 Manufatura do Compósito.....	48
4.2 Caracterização Mineralógica.....	49
4.3 Caracterização Metalográfica.....	50
4.3.1 Macroestrutura	50
4.3.2 Microscopia Ótica.....	51
4.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	53
4.4 Caracterização Química.....	56
4.4.1 Caracterização Química por Fluorescência de Raios X	56
4.4.2 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS)	57
4.4.3 Análise por Lixiviação Ácida.....	59
4.5 Estimativa da porcentagem de reforço incorporada na matriz	61
4.6 Condutância Elétrica.....	62
4.7 Ensaios Mecânicos	63
4.7.1 Ensaios de Microdureza.....	63
4.7.2 Ensaios de Tração	64
5. CONCLUSÕES	66
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	67
REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

O Alumínio com alta pureza é um metal leve e de baixa resistência comparado a outros metais de uso industrial, portanto é necessário o desenvolvimento de um meio de manter a leveza do material e aliar isso à boas propriedades mecânicas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2019).

O uso de cerâmicas tem sido comum em diversas áreas, por conta das boas propriedades no que tange a resistência ao calor, resistência à altas temperaturas e resistência à corrosão. Compostos como o SiC, são feitos a partir de matéria prima abundante, o que pode ser fundamental para possíveis aplicações em larga escala (NOGI; OGINO, 1988). Ainda assim ocorre um entrave relativamente ao comportamento em choques mecânicos, devido ao seu aspecto comumente descrito como frágil e também para sua alta massa específica (ASHBY; JONES, 2005).

Materiais compósitos são uma combinação de duas ou mais classes de materiais, que em suma, são insolúveis entre si, e podem combinar suas propriedades. Sendo compostos por uma fase contínua e uma ou mais fases dispersas, comumente chamada de reforço, podendo ser em formato de fibras, partículas ou flocos (SIJO; JAYADEVAN, 2016).

Cabe ao engenheiro e cientista de materiais desenvolver tecnologias e metodologias de fabricação capazes de melhorar as propriedades dos materiais (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2013). E com isso há a possibilidade otimizar-se as propriedades do alumínio ao adicionar-se outros componentes, tais como o carbetto de silício, durante a sua fabricação, gerando um material compósito. Para Surappa (2003), as principais vantagens de compósitos de matriz metálica, em especial, os de matriz de alumínio, são melhor resistência mecânica, leveza e melhor comportamento térmico.

A técnica de Stir Casting, fundição por agitação, trata de misturar um composto sólido a um metal fundido em movimentos circulares, normalmente feito por um rotor de maior ponto de fusão em relação ao metal fundido. Este trabalho trata de realizar uma adaptação desta técnica utilizando-se apenas de agitação manual.

1.1 Justificativa

O desenvolvimento da humanidade sempre requereu aperfeiçoamento tecnológico o qual implica na necessidade da busca de materiais que atendam às necessidades para dadas aplicações, e sempre buscando melhores características físico-químicas escalabilidade industrial e redução de custo. Com isto a ciência e engenharia de materiais entram em cena a fim de se pesquisar e aplicar industrialmente estes novos materiais (BLACK; KOHSER, 2011).

Metais leves como o alumínio, magnésio e titânio vem ganhando notório destaque no âmbito acadêmico e industrial por conta de suas propriedades de leveza e resistência mecânica. O que permite aplicações não convencionais em que o material é submetido a situações de esforços e condições adversas (DROZDOV, 2007).

Assim como os metais em si, materiais compósitos são de extrema importância na sociedade atual, por apresentarem características que juntam as propriedades dos seus componentes. Tais materiais são utilizados nas aplicações que variam das mais simples, tais como papel e madeira compensada, até blindagem balística e na indústria de automóveis de alto desempenho, além de ser empregada amplamente em aplicações aeroespaciais. Há ainda implicações comerciais tais como o Duralcan®, desenvolvido como um compósito de matriz de alumínio e com certos teores de carvão de silício, onde há a possibilidade de substituição de materiais mais comuns como aço e bronze (TEMPONIK, 2019).

Sendo assim, o desenvolvimento de compósitos de matriz metálica de bom desempenho se faz necessário, por isso, o escopo do trabalho trata-se de fabricar e caracterizar um compósito de alumínio e 5 % de carvão de silício feito a partir de agitação manual.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Processar um compósito de matriz metálica de alumínio com carbetos de silício, bem como caracterizar o material quanto a mineralogia do reforço e a metalografia do compósito as propriedades mecânicas de resistência à tração, dureza, e também propriedades elétricas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Efetuar a caracterização metalográfica, com o intuito de observar-se a interação do carbetos de silício com a matriz de alumínio e também analisar-se a solidificação desses materiais e o efeito da introdução das partículas de cerâmica.

- Caracterização da composição química do metal e do compósito por meio de Fluorescência de Raios X, Espectroscopia de Raios X por dispersão de energia, e por um método qualitativo.

- Estimar a quantidade de carbetos de silício incorporada na matriz de alumínio.

- Realizar determinação das propriedades de condutância elétrica.

- Realizar ensaios de resistência à tração e microdureza entre o Alumínio Eletrocondutor e o Compósito de Matriz Metálica criado a partir de Alumínio e Carbetos de Silício.

1.3 Síntese do Trabalho

O tópico de Revisão Bibliográfica irá tratar de um apanhado geral sobre a literatura científica especializada nos assuntos abordados no decorrer desta monografia.

Em seguida, o tópico de Materiais e Métodos abordará, de forma sucinta, as matérias-primas, equipamentos e metodologia de trabalho utilizados para a realização da etapa experimental deste trabalho.

Posteriormente, em Resultados e Discussões, haverá uma explanação dos resultados encontrados em cada experimento realizado e um comentário com embasamento técnico-científico acerca de cada ensaio.

E por fim, na Conclusão, serão revisados os objetivos e elucidados, assim como também serão propostas melhorias a fim de contribuir mais com o desenvolvimento científico do país.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, serão abordados aspectos e conceitos para uma fundamentação e auxílio teórico sobre o que será realizado durante os procedimentos experimentais do trabalho.

2.1 Metais Não Ferrosos

Historicamente, os materiais metálicos são utilizados em forma de ligas metálicas. As ligas metálicas se dividem em duas classes: Ligas Ferrosas; e Ligas não-ferrosas. Esta classificação se deve ao principal constituinte das Ligas Ferrosas, o elemento Ferro, sendo estas as mais usadas nas aplicações metálicas em projetos de engenharia. Apesar disto, ligas não-ferrosas desempenham papéis fundamentais na tecnologia atual (SHACKELFORD, 2008).

2.2 Processos de Solidificação dos Metais

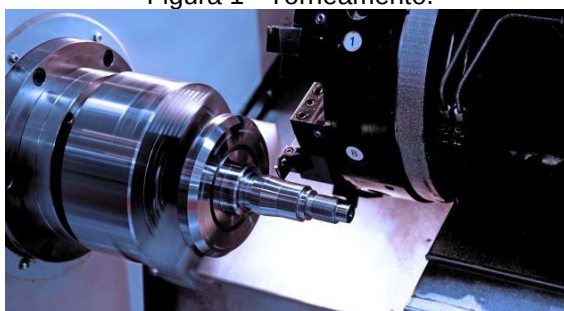
A solidificação de um metal pode ser definida como um processo de duas etapas, nucleação e crescimento, onde se faz necessária um controle minucioso das variáveis que regem este processo a fim de evitar-se defeitos na fundição. O primeiro estágio da solidificação, a nucleação, ocorre quando partículas estáveis são solidificadas a partir do metal líquido (BLACK; KOHSER, 2011).

Cada nucleação é capaz de produzir um cristal ou grão ao fim da fundição. Partículas já solidificadas podem ser introduzidas no líquido antes do vazamento no molde. Estas partículas fornecem uma superfície requerida para o início da nucleação, e com isto promovem uma nucleação mais uniforme. Este processo é conhecido como inoculação ou refinamento de grão. O segundo estágio na solidificação é o de crescimento, onde a energia térmica do líquido é utilizada para a solidificação de mais material. Fatores como a direção, taxa e tipo de crescimento do grão podem ser controladas conforme a forma extração de calor é alterada (GARCIA, 2007).

2.3 Usinagem de Metais

Segundo Ferraresi (1970), a usinagem é a operação onde há a produção de cavaco ao conferir a uma peça forma, dimensões ou acabamento, sendo este cavaco a retirada de material da peça a partir da ferramenta, apresentando formatos irregulares. Os processos de usinagem são diversos, tais como torneamento, aplainamento, furação, fresamento, retificação e diversos outros, sendo cada um essencial para certos fins e capaz de desenvolver certos tipos de modificações na peça. O processo de torneamento pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 - Torneamento.



Fonte: Mecânica Industrial (2019).

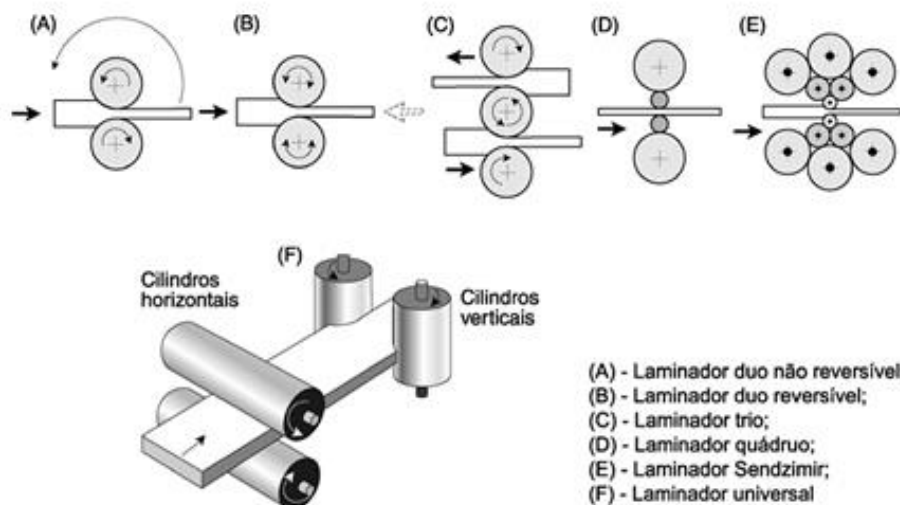
2.4 Conformação Plástica de Metais

A conformação plástica dos metais é definida por Bresciani (2011) como um processo de fabricação por tensões aplicadas a um material abaixo de seu limite de resistência à ruptura. Sendo utilizada para conferir dimensão e forma a um metal, permitindo a fabricação de peças com características controladas.

2.4.1 Laminação

Bresciani (2011) estabelece a laminação como a passagem de uma peça entre dois cilindros, os quais agiram como compressores a fim de obter-se uma tensão superior ao limite de deformação elástica do material, assim conseguindo modificar as dimensões da peça. Este processo pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Processos de Laminação.



Fonte: Associação Brasileira do Alumínio (2019).

2.5. Alumínio

O alumínio é o metal mais abundante na crosta terrestre, além de ser o terceiro elemento mais comum em peso. O minério mais importante para a extração do alumínio é a bauxita, a qual é constituída de diversos minerais de óxidos de alumínio hidratados. Uma característica importante do Alumínio é a fina camada de óxido de alumínio formada na superfície, tornando relativamente resistente à corrosão, favorecendo seu uso na indústria alimentícia, aeronáutica e da construção civil (SCICAST, 2018).

Outro atributo importante do Alumínio é sua extrema reatividade com o Oxigênio, em um tipo de reação conhecida por *Thermite*, ou aluminotermia, onde ocorre a reação do Alumínio metálico com algum óxido metálico ou semimetálico, resultando na redução deste óxido a sua forma elementar e a formação de óxido de alumínio (LEE, 1999).

2.5.1 Bauxita

A bauxita é um minério que vem a ser uma das maiores fontes naturais do elemento Alumínio, apresentando uma coloração avermelhada devido a presença de óxidos de Ferro, sendo catalogada primeiramente por Berthier (1821), na localidade de *Les Baux*, ao sul da França.

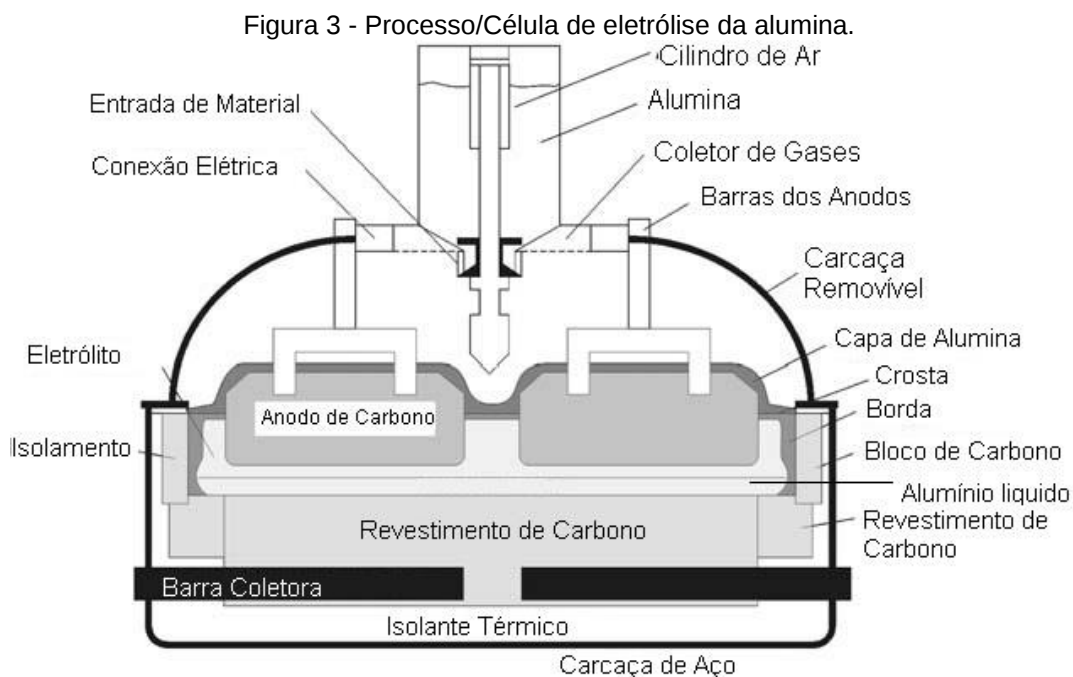
A composição desta rocha é uma mistura impura de minerais de Alumínio, sendo os mais importantes os minerais Gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$, Diásporo $\text{AlO}(\text{OH})$ e Boehmita $\text{AlO}(\text{OH})$, sendo estes dois últimos diferentes por conta da organização cristalina. As impurezas são encontradas em diversos teores de principalmente óxidos de Ferro, Argila, Sílica e Dióxido de Titânio. As bauxitas economicamente viáveis são as que apresentam conteúdo de Alumina (Al_2O_3) entre 50 e 55 % (CUNHA, 2015).

Em geral, o processo mais comum bauxita de beneficiamento é uma sequência de britagem, moagem e peneiramento, para então ser submetido ao processo Bayer. Este processo trata-se de uma digestão alcalina por meio de Hidróxido de Sódio (NaOH), em autoclaves em que o licor é separado da Lama Vermelha, um concentrado dos minerais insolúveis na solução (LUZ; LINS, 2008).

As reservas mundiais do minério de bauxita estimadas são de cerca de 27,8 bilhões de toneladas, sendo o Brasil o terceiro colocado com 2,6 bilhões de toneladas. A extração brasileira deste minério no ano de 2016 alcançou 34,5 milhões de toneladas. com o estado do Pará, vem sendo o maior expoente nacional com 94,2 % da produção (MONTEIRO; FARIAS, 2018).

2.5.2 Eletrometalurgia

A produção do Alumínio metálico é feita principalmente a partir da decomposição eletrolítica da Alumina é descrita no processo Hall-Héroult (TOTTEN; MACKENZIE, 2003). Este processo é mostrado na Figura 3.



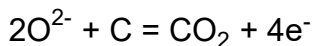
Fonte: Adaptado de Totten e Mackenzie (2003).

O processo Hall-Héroult é a eletrólise da Alumina fundida em uma solução de Criolita (Na_3AlF_6) a cerca de 980 - 1000 °C, onde há deposição de Alumínio líquido, de alta pureza no catodo e a formação de Dióxido de Carbono no anodo de Carbono, o qual é consumido pelo Oxigênio proveniente da Alumina. Por conta deste procedimento se tratar de uma eletrólise, notadamente há um consumo expressivo de energia elétrica, cerca de 12 kWh.kg⁻¹ (TOTTEN; MACKENZIE, 2003). As reações químicas deste processo podem ser simplificadas à algumas reações, mostradas na equação 1, 2 e 3:

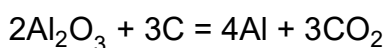
Reação Catódica:



Reações Anódicas:



Reações Globais:



A Criolita é utilizada na eletrólise da Alumina por algumas razões entre as quais sendo por um bom solvente para a Alumina, atuar como um fundente, uma substância que reduz o ponto de fusão de outra, para a Alumina, ser um bom condutor elétrico no estado fundido, apresentar um baixo ponto de fusão e menor densidade em relação ao Alumínio líquido formado, o que permite a coleta no fundo da célula eletrolítica (DROZDOV, 2007).

2.5.3 Propriedades do Alumínio

Algumas das principais características do Alumínio e outras ligas metálicas são mostradas no Quadro 1.

Quadro 1 - Características típicas do Alumínio e outros metais.

Liga Metálica	Densidade (g.cm ⁻³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Resistividade Elétrica (Ω.m)
Alumínio 1100	2,71	69	124	2,9.10 ⁻⁸
Aço 1020 (trabalhado a frio)	7,85	207	420	1,6.10 ⁻⁷
Aço Inoxidável 316 (trabalhado a frio)	8	193	620	7,4.10 ⁻⁷
Cobre C11000	8,89	115	345	1,72.10 ⁻⁸

Fonte: Adaptado de Callister Junior e Rethwisch (2013).

2.6 Carbetto de Silício

O Carbetto de Silício, é um composto covalente (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2013), também conhecido por *carborundum*, é um material comumente utilizado como um abrasivo devido a sua alta dureza (MIESSLER; FISCHER; TARR, 2014), por conta da estrutura, semelhante ao diamante. É incolor quando puro, mas é geralmente encontrado com um certo teor de ferro, conferindo a este material uma cor enegrecida. Sendo um material pouco reativo, não é atacado por ácidos, com a exceção do ácido fosfórico (H_3PO_4), mas é atacado por hidróxido de sódio (NaOH) e por gás cloro (Cl_2).

A produção deste material consiste no aquecimento de quartzo e um excesso de coque em fornos elétricos a 2000 - 2500 °C (LEE, 1999), seguido de uma descarga elétrica no processo inventado por E. G. Acheson (BLACK; KOHSER, 2011).

2.6.1 Propriedades do Carbetto de Silício

O Quadro 2 mostra algumas das características do Carbetto de Silício e de outros materiais cerâmicos comuns.

Quadro 2 - Características típicas de cerâmicas.

Composto	Densidade (g.cm ⁻³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Microdureza Vickers	Resistividade Elétrica (Ω.m)	Custo (US\$.kg ⁻¹)
Carbetto de Silício	3,2	207-483	25,4	1-10 ⁹	250
Alumina (99,9 % de pureza)	3,98	380	26,5	10 ¹³	1,85-2,80
Vidro comum	2,23	70	6,1	10 ¹³	9,20-11,30
Concreto	2,4	25,4-36,6		10 ⁹	0,05

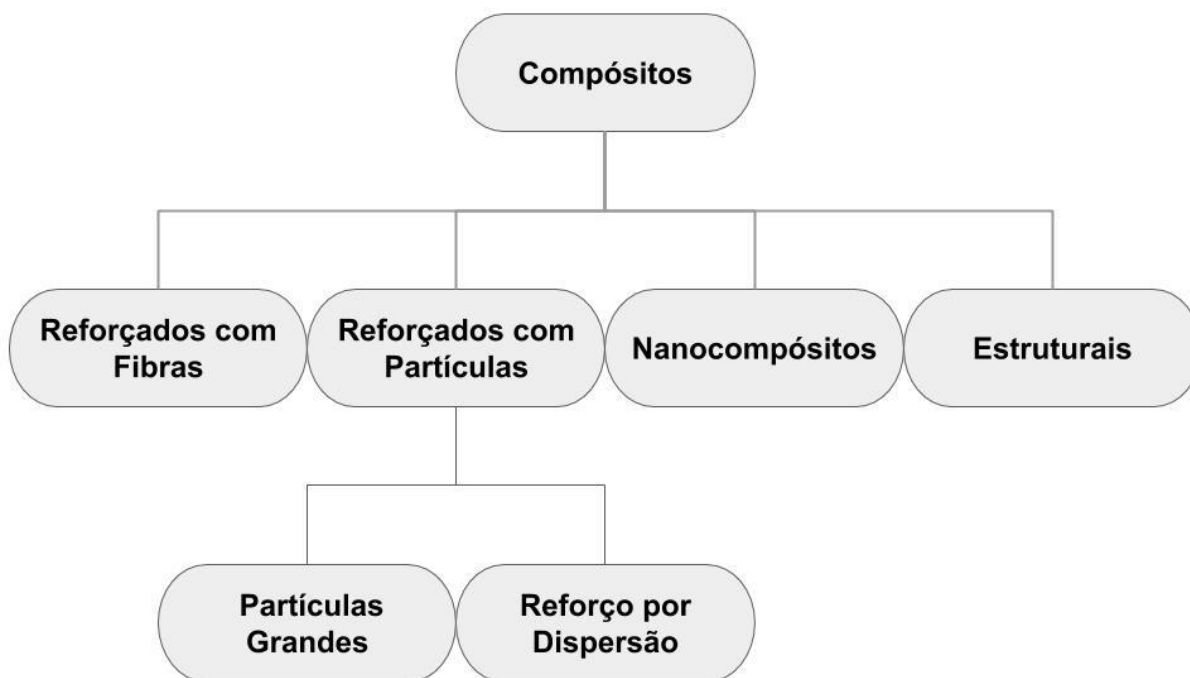
Fonte: Adaptado de Callister Junior e Rethwisch (2013).

2.7 Compósitos com Fase Partícula

Há séculos a civilização vem utilizando compósitos agregados, ou compósitos reforçados com partículas, ao exemplo do concreto utilizado pelos romanos. E com o avanço da tecnologia, novos materiais compósitos reforçados com partículas surgiram, tais como os cermetos, materiais feitos de cerâmicos e metais específicos,

borrachas vulcanizadas, papel comum e diversos outros (SHACKELFORD, 2008). Na Figura 4 são mostradas as classificações dos materiais compósitos.

Figura 4 - Classificações dos Materiais Compósitos.



Fonte: Adaptado de Callister Junior e Rethwisch (2013).

A utilização industrial de compósitos de matrizes metálicas é algo em crescimento em áreas de tecnologia refinada, tais como a automobilística e aeroespacial. Compósitos deste tipo utilizam-se de fibras contínuas e descontínuas e também particulados a fim de reforçar o metal matriz (GIREESH *et al.*, 2018). Kelly e Tyson (1965) encontraram notáveis resultados para compósitos de matriz de Cobre e fibras de Tungstênio e Molibdênio.

Compósitos metálicos com fase partícula são materiais bastante estudados em meio acadêmico. Isto se deve aos resultados interessantes em sua interação com a matriz, normalmente atuando positivamente em suas propriedades mecânicas. No Quadro 3 são mostrados alguns estudos já realizados acerca de compósitos de matriz metálica.

Quadro 3 - Características mecânicas de compósitos metálicos.

Matriz	Reforço	Limite de Resistência à Tração	Microdureza Vickers	Dureza Brinell	Autor
Cobre	Fibras de Tungstênio	1558 MPa	-	-	Kelly e Tyson (1965).
Cobre	Fibras de Molibdênio	779 MPa	-	-	Kelly e Tyson (1965).
Alumínio LM06	Partículas de Grafite, SiO ₂ e Cinzas Volantes	-	-	45,96 BHN	Anand, Sribalaji e Akliesh (2016).
Alumínio Comercialmente Puro	Ilmenita	180 MPa	45 VHN	-	Rasidhar, Rao e Krishna (2013).
Alumínio Al 6061	Cinzas de Casca de Arroz e Cinzas Volantes	410 MPa	-	69 BHN	Subrahmanyam, Narsaraju e Rao (2015).
Alumínio Comercialmente Puro	Cinzas Volantes	104 MPa	-	28 BHN	Gireesh <i>et al.</i> (2018).
Alumínio Comercialmente Puro	Pó de Aloe Vera	119 MPa	-	33 BHN	Gireesh <i>et al.</i> (2018).
Alumínio A356.2	Cinzas de Casca de Arroz	312 MPa	-	81 BHN	Prasad e Krishna (2011).
Alumínio AA 6063	Alumina, Cinzas de Casca de Arroz e Grafite	145 MPa	80 VHN	-	Alaneme e Sanusi (2015).

Fonte: Autor.

2.7.1 Alumínio Reforçado com Partículas de Carbetto de Silício

É notável a importância de uma boa interação entre a matriz e o reforço em um compósito. A interação entre o Alumínio e o Carbetto de Silício em certas condições, pode levar a formação do composto de Al₄C₃-SiC, mencionado por Schneider *et al.* (1979) na forma de α -Al₄SiC₄ em temperaturas elevadas.

E por conta da formação deste composto, e para Arsenault e Pande (1984) há uma difusão de Alumínio, relativamente profunda, em meio ao particulado de Carbetto de Silício, por conta de propriedades termodinâmicas. Isto pode ajudar a formulação de uma hipótese deste composto promover uma maior ancoragem entre matriz e particulado.

O Quadro 4 apresenta algumas composições de compósitos a base de Alumínio e Carbetto de Silício e as correlações com suas propriedades mecânicas.

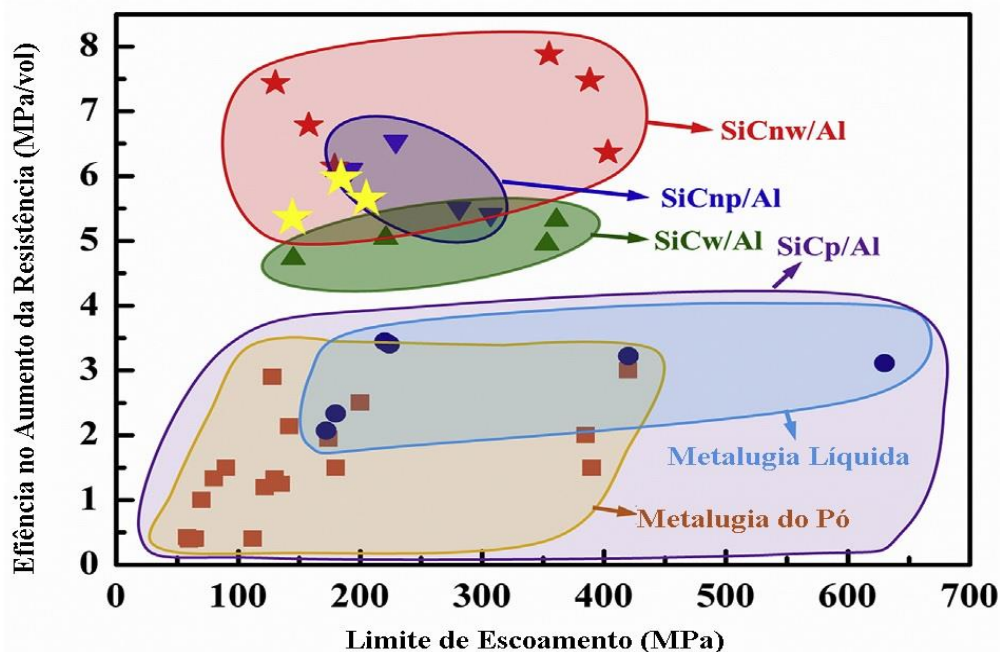
Quadro 4 - Características de Compósitos de Alumínio reforçados com carbeto de silício.

Liga de Alumínio	Reforço	Limite de Resistência à Tração	Microdureza Vickers	Dureza Brinell	Autor
Alumínio Comercialmente Puro	SiC 320 Mesh	-	-	45,5 BHN	Singla <i>et al.</i> (2009).
AA 2024	SiC 100 nm e Grafite 40-50 nm	-	-	84 BHN	Kumar, Manisekar e Ravindran (2014).
A359	SiC 17 μm	336 MPa	236 HVN	-	Matikas e Hasan (2011).
Alumínio Comercialmente Puro	SiC 53-74 μm	77 MPa	45,4 HVN	-	Rahman e Rashed (2014).
Al6061	SiC 30 μm	-	72,2 HVN	-	Mahajan <i>et al.</i> (2015).
Al 6063	SiC 200-400 mesh	360 MPa	-	82 BHN	Meena <i>et al.</i> (2013).
A 356	SiC 25 μm e Grafite 44 μm	140 MPa	144 HVN	-	Viswanatha <i>et al.</i> (2013).

Fonte: Autor.

É importante citar, que apesar de os sistemas de Carbetto de Silício em formato de particulado serem notadamente eficientes no reforço do Alumínio, autores como Xin *et al.* (2017) demonstram um grande aumento na resistência proporcionalmente ao volume quando o Carbetto de Silício é utilizado na forma de nanofios, nanopartículas ou nanowhiskers, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Esquematisação dos materiais e métodos de fabricação do compósito com a resistência do material.



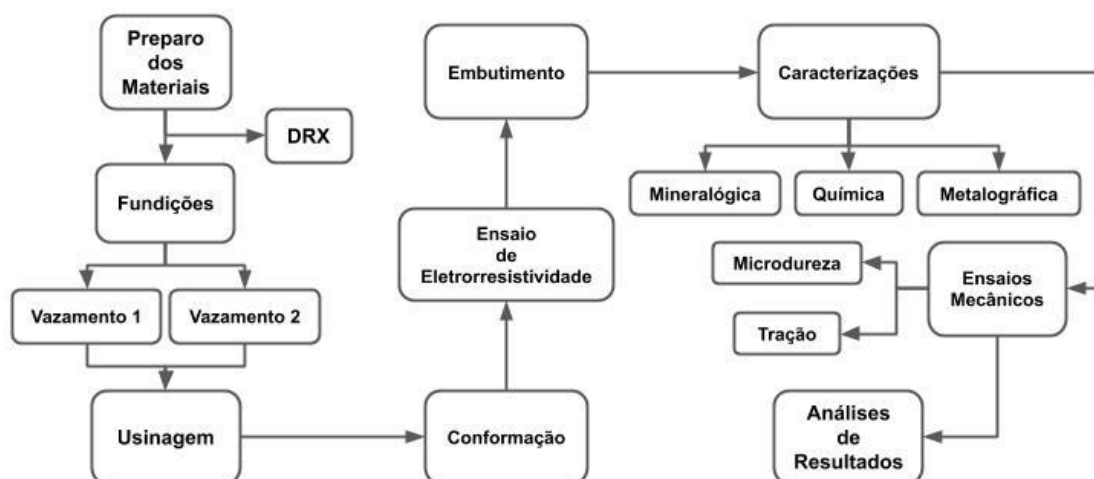
Fonte: Adaptado de Xin *et al.* (2017).

Visto isso, cabe ao cientista e engenheiro de materiais desenvolver novos materiais e melhorar os já existentes por meio de processos termoquímicos ou físicos como formular hipóteses embasadas nos conhecimentos das propriedades dos materiais e com isso formular metodologias para investigar as interações da estrutura de um material com o meio em que ele poderá ser aplicado (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A esquematização mostrada no fluxograma mostrado na Figura 6 ilustra o desenvolvimento linear do trabalho, para uma simplificação dos procedimentos realizados.

Figura 6 - Fluxograma sobre a realização do trabalho.



Fonte: Autor.

3.1 Preparo de Materiais

Na etapa inicial do processo de fundição, há um procedimento a fim de facilitar o processamento, o qual consiste da aplicação de uma fina camada de alumina em pó no cadinho na, Figura 7 (a) e no molde, Figura 7 (b), se faz indispensável para facilitar o desmolde e limpeza posterior. Esta etapa consiste no lixamento da parte interna do molde e do cadinho, nos locais que entram em contato com o metal fundido, e em seguida, aquecimento a cerca de 250 °C em estufa, com a finalidade de auxiliar a aplicação de uma solução de alumina em ambos.

Figura 7 - Cadinho (a) e Molde (b).



Fonte: Autor.

Além disto, o preparo inicial do pó de Carbetto de Silício, Figura 8 (a), consiste em peneiramento por meio de uma peneira de abertura de $75\ \mu\text{m}$, mostrada na Figura 8 (b), equivalente a 200 *mesh* segundo o fabricante das peneiras, para uma maior uniformização em meio ao metal fundido durante o vazamento. O Carbetto de Silício já peneirado também foi cominuído em almofariz e pistilo de porcelana, a fim de promover uma melhor varredura por meio de Difractometria de Raios-X.

Figura 8 - Carbetto de Silício (a) e Peneira de 75 microns (b).



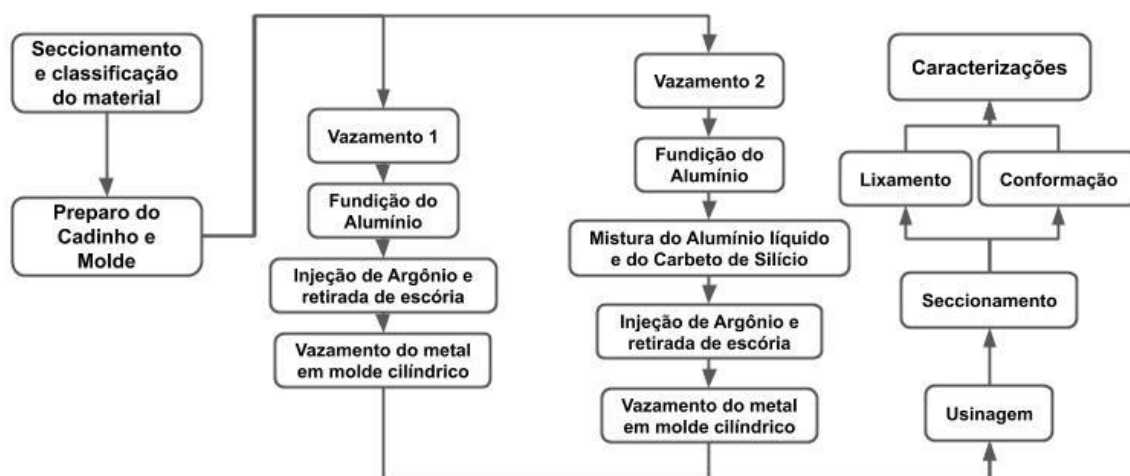
Fonte: Autor.

3.2 Fundição

Nesta etapa ocorre uma divisão dos métodos para a diferenciação dos materiais. A fim de melhor classificar, esta subseção será dividida em vazamento 1 e vazamento 2.

Para fim de auxílio, o processo de manufatura dos materiais é mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma para a fundição e preparo das amostras.

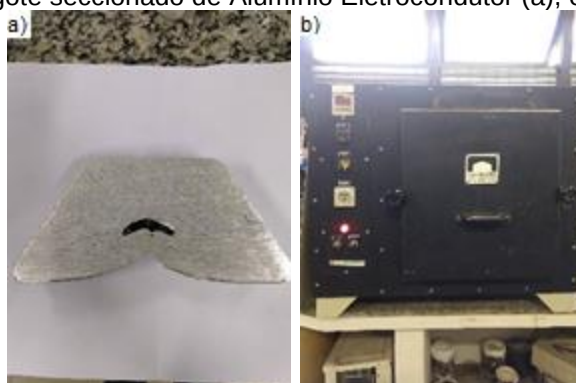


Fonte: Autor.

3.2.1 Vazamento 1

A fundição deste material, Alumínio EC, com composição aproximada de 0,0038 % de Cu, 0,155 % de Fe e 0,0005 % de Zr, segundo Alfaia (2016), visto na Figura 10 (a), ocorreu em um forno tipo mufla, mostrado na Figura 10 (b), localizado no Laboratório de Metalografia e Tratamento Térmico, alocado no Laboratório de Engenharia Mecânica, no Campus Profissional da Universidade Federal do Pará.

Figura 10 - Lingote seccionado de Alumínio Eletrocondutor (a), e forno mufla (b).



Fonte: Autor.

O procedimento utilizado foi alocar o alumínio dentro do cadinho e colocar o conjunto dentro da câmara do forno, já aquecido a 900 °C, por cerca de uma hora (1 h), e após a verificação da completa fusão do metal e borbulhamento de gás Argônio comprimido, para a degaseificação, com o seu cilindro mostrado na Figura 11, o

líquido foi vertido em um molde permanente de aço em formato cilíndrico e resfriado a ar em temperatura ambiente. Após isso, houve a prensagem para a retirada do lingote do interior do molde.

Figura 11 - Gás Argônio.



Fonte: Autor.

3.2.2 Vazamento 2

Igualmente ao Vazamento 1, o alumínio foi fundido a 900 °C por 1 h, em seguida foi borbulhado com gás Argônio a fim de auxiliar na remoção de escória.

A diferença deste procedimento em relação ao Vazamento 1 se deve a incorporação do carbeto de silício na massa de alumínio fundido, a qual se fez pelo uso de um fino invólucro de composto de alumínio laminado de massa desprezível que foi pré-aquecido a 250 °C, o qual foi introduzido no topo do alumínio fundido e em seguida agitado manualmente por cerca de 2 minutos, devido à dificuldade no processamento por conta da temperatura. Após isso houve um reaquecimento por cerca de 10 minutos na mufla para não haver uma diferença significativa nos padrões de solidificação em relação ao material sem o carbeto de silício. Por fim, o cadinho com a mistura foi agitado novamente e vertido em molde permanente de aço e foi resfriado a ar em temperatura ambiente.

3.3 Usinagem

A etapa de usinagem consistiu em realizar-se a usinagem em torno mecânico, a fim de reduzir o diâmetro dos cilindros para dezoito e meio milímetros (18,5 mm), visto na Figura 12. Também foi realizado o seccionamento em peças de dimensões

de 10 mm de espessura para atender as necessidades da metalografia e ensaio de microdureza.

Figura 12 - Peça usinada.



Fonte: Autor.

3.4 Conformação

A conformação dos materiais foi realizada em dois laminadores duo reversíveis, Figura 13, com diversas canaletas para a conformação de arames, começando esta redução de diâmetro em 18,5 mm e reduzindo até o diâmetro de 3,0 mm.

Figura 13 - Laminador elétrico duo reversíveis da marca MENAC.



Fonte: Autor.

O material conformado é mostrado na Figura 14, posteriormente os fios foram utilizados para a realização de ensaios de tração seguindo recomendações da NBR 5118 - 1985 (ABNT, 1985), e também de condutividade elétrica sob recomendações da norma NBR 5285 - 1985 (ABNT, 1985) e a norma NBR 6814 – 1986 (ABNT, 1986).

Figura 14 - Fio laminado em 3 mm de diâmetro.

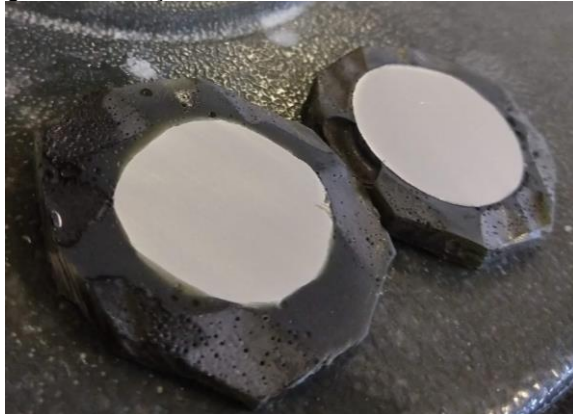


Fonte: Autor.

3.5 Embutimento

No processo de embutimento o material foi utilizando-se resina poliéster isoftálico, acelerador de Octoato de Cobalto e iniciador de Metil-Etil-Cetona. A mistura dos três reagentes foi realizada conforme as recomendações do fabricante e em seguida foi vertida na peça a fim de melhorar a maneabilidade do material na etapa de preparo metalográfico, e após a cura sua aparência é mostrada na Figura 15.

Figura 15 - Peças embutidas em Poliéster Isoftálico.



Fonte: Autor.

3.6 Caracterização Mineralógica

A difratometria de raios X foi realizada em uma máquina da Rigaku Corporation, modelo Miniflex 600, com o eletrodo de cobre. A Figura 16 ilustra o difratômetro. A leitura dos dados foi executada utilizando o software proprietário PANalytical X'Pert HighScore Plus.

Figura 16 - Rigaku Miniflex 600.



Fonte: Rigaku (2019).

3.7 Caracterização Metalográfica

A caracterização metalográfica foi realizada com através das caracterizações de macroestrutura, microestrutura por microscopia ótica, e por microscopia eletrônica de varredura (MEV), combinada com espectroscopia de raios X por dispersão em energia, a fim de determinar, de forma semi-quantitativa, as concentrações de dados elementos em certos pontos do material. Tais métodos combinados permitem a correlação entre algumas propriedades do material com sua estrutura.

3.7.1 Macroestrutura

O procedimento para obter-se a macroestrutura foi a partir de lixamento em lixas de números 80, 120, 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 e 2500. Em sequência efetuou-se o polimento utilizando-se de solução de alumina de 1 μm , ambos realizados em uma politriz metalográfica, mostrada na Figura 17. A solução utilizada foi de 1 M de CuCl_2 (Cloreto Cúprico), por conta da recomendação do manual da ASM International (1992), alternando-se intervalos de imersão por 15 segundos com momentos de enxágue e análise da peça até obter-se o efeito desejado.

Figura 17 - Politriz.



Fonte: Autor.

3.7.2 Análise de Microscopia Ótica

Após a caracterização de macroestrutura, as peças foram levadas a um microscópio ótico, Nikon LV-UEPI, mostrado na Figura 18, com ocular de aumento de 10 x, e objetiva com ampliação de 5 x, 10 x, 20, 50 x e 100 x, totalizando uma magnificação máxima de cerca de 1000 x.

Figura 18 - Microscópio Nikon LV-UEPI.



Fonte: Autor.

Uma solução de 0,5 % de ácido fluorídrico foi utilizada para realizar o ataque químico nas duas amostras, matriz e compósito, por conta da sua reatividade alta com metais e cerâmicos. O procedimento foi de imersão por cerca de 30 segundos,

seguidos de lavagem em água destilada e etanol de pureza analítica para a remoção de quaisquer vestígios de ácido em contato com a amostra. O material de apoio utilizado para os ataques é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Material de apoio utilizado para ataque de com ácido fluorídrico 0,5 %.



Fonte: Autor.

Este procedimento foi realizado com o fim de verificar-se a presença de defeitos superficiais e possíveis interfaces entre partículas de carbetos de silício e o alumínio, além de possíveis influências no padrão de solidificação do material.

3.7.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

As micrografias foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca HITACHI, modelo TM 3000, ilustrado na Figura 20. A configuração do equipamento foi de kV 15, e magnificação máxima de 3000 x. A este equipamento, foi acoplado o sistema espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) descrito no tópico 3.8.2, mostrado a seguir

Figura 20 - Microscópio Hitachi TM 3000.



Fonte: Autor.

3.8 Caracterização Química

A caracterização química foi fundamental para o entendimento das interações físico-químicas dos materiais estudados, portanto ela foi realizada com diferentes métodos quantitativos, semi-quantitativo e qualitativos.

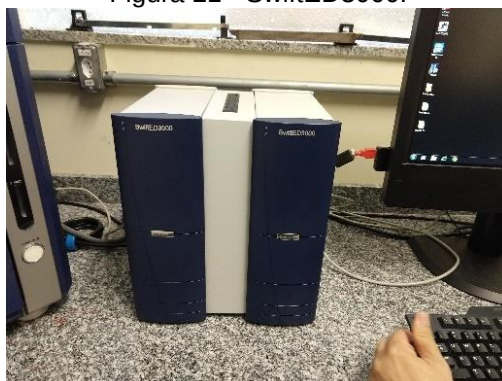
3.8.1 Fluorescência de raios X

A análise quantitativa por fluorescência de raios X proporcionou as porcentagens em massa (peso) dos elementos químicos presentes nas amostras do material presente no alumínio e no compósito.

3.8.2 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS)

Esta análise foi realizada pelo equipamento SwiftED3000, acoplado ao MEV descrito no tópico 3.11.3, mostrado na Figura 21. Suas imagens e leitura foram realizadas em uma tensão de 15 kV nas amostras.

Figura 21 - SwiftED3000.



Fonte: Autor.

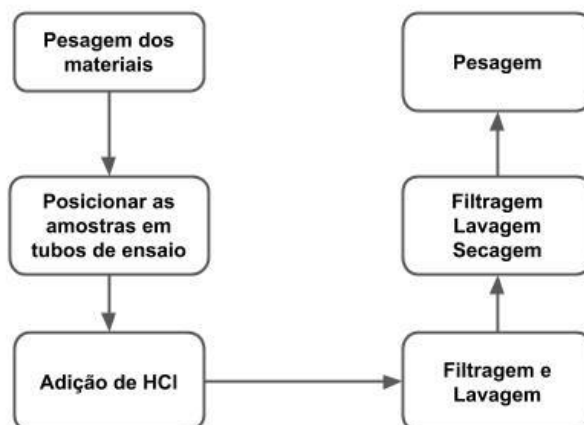
3.8.3 Análise por lixiviação ácida

Este método de caracterização se baseia na não dissolução do Carbetto de Silício em meio a uma solução de Ácido Clorídrico, então pode-se medir a massa resultante, e também na análise das cores as quais a solução pode apresentar. Para este método, foram utilizados os seguintes materiais: Amostras do Carbetto de Silício, Alumínio e Compósito; Tubos de Ensaio; Ácido Clorídrico de Pureza Analítica, a cerca

de 38 %; Aparato para filtração simples; Balança analítica com precisão de 0,1 mg; Estufa laboratorial; e, por fim, uma capela para a exaustão de gases e fumos.

Um fluxograma do processo pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 - Fluxograma da Lixiviação Ácida



Fonte: Autor.

O procedimento foi realizado partindo-se do princípio da não dissolução em ácido clorídrico do carбето de silício presente no compósito. Portanto as amostras, tanto do alumínio, do compósito e do carбето de silício em pó, foram divididas em pequenos grupos de 6 amostras para cada composição, que foram posteriormente pesados, transferidos para um tubo de ensaio, acrescidos de 10 ml de água destilada, seguidamente, adicionou-se ao frasco cerca de 10 ml de ácido clorídrico concentrado.

A execução desse procedimento é mostrada na Figura 23.

Figura 23 - Experimento de lixiviação ácida.



Fonte: Autor.

Após o ataque ocorrer por 24 h, para a completa dissolução das regiões reativas, a solução foi filtrada e lavada consecutivamente até atingir-se o pH neutro, para a não , no sistema de filtração simples mostrado na Figura 24 .

Figura 24 - Sistema para a filtração simples



Fonte: Autor.

Após isso, a torta resultante da filtração foi seca em estufa, transferida para um dissecador em vácuo parcial, mostrados na Figura 25, e pesada em balança analítica com precisão de 0,1 mg.

Figura 25 - Dissecador acoplado à bomba a vácuo (a), e estufa para secagem (b).



Fonte: Autor.

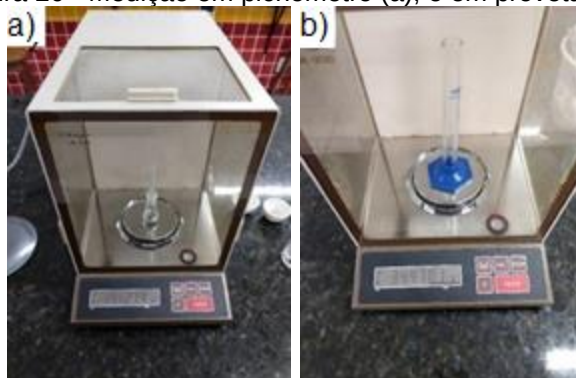
Partindo-se do princípio de que a amostra puramente metálica não deve apresentar materiais retidos, é possível inferir que a equação 4 resulta na proporção de metais, no caso, a porção de matriz atacada pelo ácido, e representa isto em porcentagem mássica.

$$M \%_{\frac{m}{m}} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \% \quad (4)$$

3.9 Determinação da porcentagem de reforço incorporada na matriz

Para esta análise, foram utilizados picnômetro de 5 ml, proveta graduada de 10 ml, com escala em 0,1 ml e balança analítica de precisão de 0,1 mg, mostrados na Figura 26. E também, é importante citar que foram realizadas duas análises diferentes partindo-se do mesmo princípio, de medir a massa de água deslocada a partir de dado volume de substância ou objeto. A primeira utiliza picnômetros para a medição de volumes, usando a norma ASTM B873 – 17 (ASTM, 2017) como princípio. Enquanto a segunda utiliza-se de uma proveta graduada, adaptando-se a norma ASTM D7481 – 18 (ASTM, 2018).

Figura 26 - Medição em picnômetro (a), e em proveta, (b).



Fonte: Autor.

3.10 Determinação da Condutância

Para este teste, os arames de 3,0 mm de diâmetro foram seccionados em porções superiores a 150,0 mm a fim de promover uma maior liberdade para a fixação da garra e ainda assim manter-se relativa precisão na medição da distância entre as garras. Um termopar foi associado ao sistema a fim de conferir boa confiabilidade na aferição de temperatura de ensaio realizado pelo Multiohmímetro MEGABRÁS (ponte de kelvin), modelo MPK-2000, Figura 27. A corrente usada foi de 1 A.

Figura 27 - Multiohmímetro montado para o ensaio.



Fonte: Autor.

Para a determinação da resistividade elétrica, foi utilizada uma equação fornecida pela norma NBR 6814 – 1986 (ABNT, 1986), mostrada pela equação 5:

$$R_{t_0} = \frac{R_t}{1 + \alpha_{t_0}(t - t_0)} \quad (5)$$

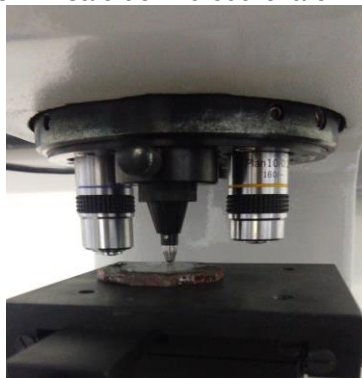
3.11 Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica foi realizada utilizando-se de dois ensaios, ensaio de dureza e ensaio de tração.

3.11.1 Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado sob a normativa ASTM E 384 – 17 (ASTM, 2017), pelo Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais (GPEMAT) dependências do Laboratório de Engenharia Mecânica, utilizando-se de um microdurômetro de modelo HV1000-B. A carga utilizada foi de 100 grama-força, por 12 segundos. O ensaio foi realizado com cerca de 15 indentações, distanciadas 1 mm uma das outras, em cada amostra. Na Figura 28, é mostrada a execução do procedimento pelo microdurômetro.

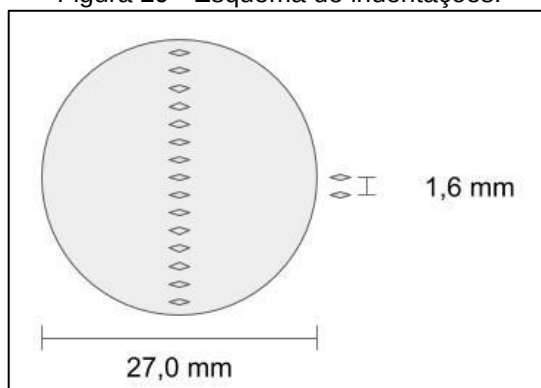
Figura 28 - Ensaio de Microdureza em execução.



Fonte: Autor.

As indentações seguiram o esquema mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Esquema de indentações.



Fonte: Autor.

3.11.2 Ensaio de Tração

Foram utilizados 3 corpos de prova para cada composição (Matriz de Alumínio e Compósito Al-SiC), e estes foram submetidos a recomendações da norma NBR 5118 – 1985 (ABNT, 1985), para determinação do limite de resistência à tração, com célula de carga de 3000 N, com comprimento útil de 15 cm, com um esquema mostrando suas dimensões na Figura 30, e também na velocidade de ensaio foi de 2 mm.min⁻¹.

Figura 30 - Corpo de Prova do Ensaio de Tração.



Fonte: Autor.

Os ensaios foram realizados em duas máquinas de ensaios distintas, uma delas foi uma KRATOS modelo IKCL1 – USB, disponível no Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA, mostrada na Figura 31. A segunda máquina, uma máquina AROTEC WDW- 100E, pertencente ao IFPA, Campus Belém, mostrada na Figura 32.

Figura 31 - KRATOS, no laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA.



Fonte: (DIAS, 2016).

Figura 32 - Máquina de Ensaio Universais AROTEC WDW- 100E, no IFPA.



Fonte: Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão mostrados e formuladas hipóteses com embasamento teórico acerca dos resultados dos experimentos desenvolvidos durante a execução do trabalho.

4.1 Manufatura do Compósito

Foi notado durante a fabricação do compósito uma certa dificuldade na homogeneização entre o alumínio fundido e o carvão de silício, sendo notada uma segregação, mostrada na Figura 33 entre os dois constituintes.

Figura 33 - Fundição do compósito.



Fonte: Autor.

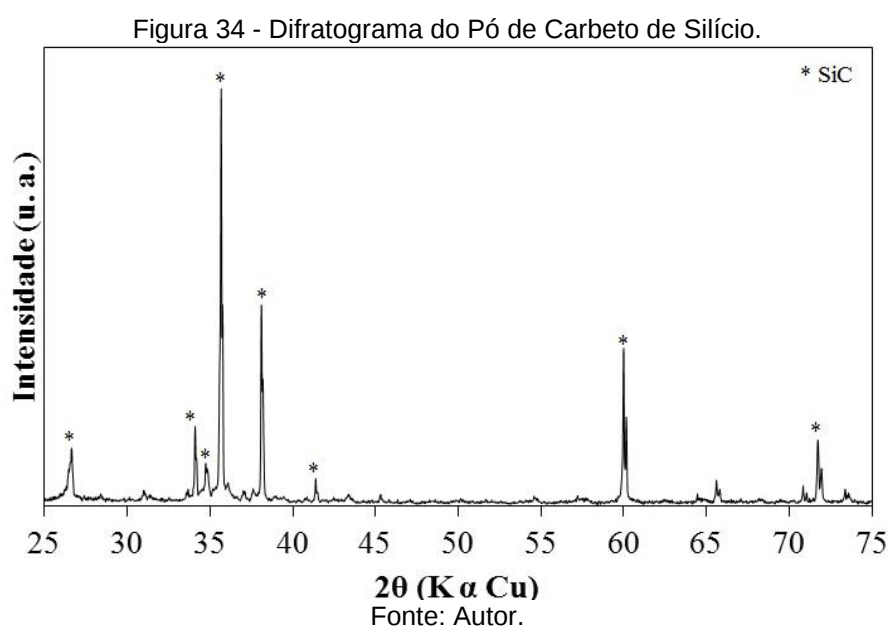
Isso pode estar relacionado ao caráter de repulsão do alumínio fundido devido à tensão superficial alta quando em contato com certos tipos cerâmicos (MOLINA *et al.*, 2007).

Essa repulsão entre os constituintes do compósito diminui com o decorrer do tempo, por conta da possível formação do intermetálico Al_4C_3 , material de alta dureza e fragilidade, o qual poderia prejudicar o comportamento mecânico do compósito, apesar de melhorar sua molhabilidade (FERRO; DERBY, 1995). A formação deste composto, também tem influência da temperatura de processamento, Shimbo, Naka e Okamoto (1989) obtiveram drásticas reduções do ângulo de contato entre o alumínio

e o carbeto de silício a partir de temperaturas 1373 K, aproximadamente 1099,85 °C, as quais induzem a boa adesão entre os constituintes do compósito.

4.2 Caracterização Mineralógica

A Figura 34 apresenta o difratograma de raios-X do Carbeto de Silício utilizado neste trabalho, apresentando os principais picos cristalinos presentes no material.



A partir da visualização da Figura 34 é possível observar pelos picos do espectro de difração de raios X, que a amostra do pó de Carbeto de Silício no difratograma apresentado, mostra, por meio de observação da quantidade e área dos picos indica que o Carbeto de Silício apresenta a maior proporção em relação aos outros minerais que não obtiveram picos representativos.

Não se realizou análise quantitativa ou semi quantitativa, ao exemplo do método de refino descrito por Rietveld (1969).

Analizando-se o padrão cristalográfico, é notada a presença do Carbeto de Silício α de acordo com os picos principais em $2\theta = 34^\circ$; $35,7^\circ$; $38,7^\circ$; 60° ; $73,6^\circ$. Tais picos são correspondentes ao encontrado por Ceballos-Mendivil *et al.* (2014), Gentile, Xiao e Abram (2013). Esse fato pode ser explicado pela fácil síntese desse

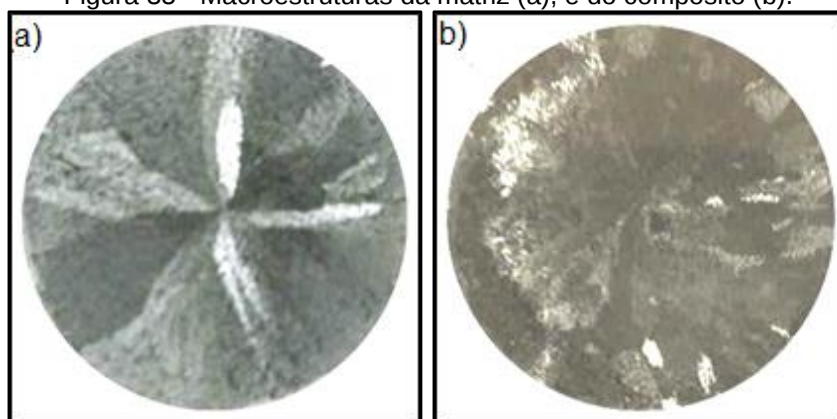
alótropo do carbeto de silício, e com isso há uma maior probabilidade desta fase ser encontrada comercialmente, sendo comumente utilizado como abrasivo.

4.3 Caracterização Metalográfica

4.3.1 Macroestrutura

A macroestrutura da matriz de alumínio é mostrada na Figura 35.

Figura 35 - Macroestruturas da matriz (a), e do compósito (b).



Fonte: Autor.

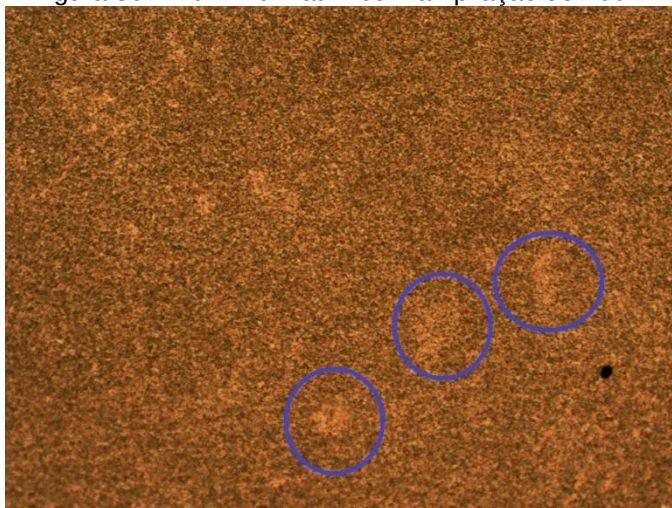
É notado um maior refinamento de grãos na amostra do compósito, visto que há menor presença de grãos do tipo colunar, em relação à matriz, isso pode ser explicado pela hipótese de Habibnejad-korayem, Mahmudi e Poole (2009), em que as partículas atuam como agentes nucleantes durante o resfriamento e solidificação.

Para Garcia (2007), a parede do molde age começando a formar núcleos em sua superfície, que tendem a crescer a partir dela. Além disso, os agentes nucleantes devem ser insolúveis e se possível, com baixa atividade química com a solução líquida, além de apresentarem boa área superficial, então, pode-se inferir que o notável refino visto na Figura 35, pode estar correlacionado com a introdução das partículas de carbeto de silício, que apesar de estarem em pequena quantidade, já podem estar atuando como refinadores de grão, favorecendo assim a formação de grãos menores no compósito, se comparado com a matriz.

4.3.2 Microscopia Ótica

Após o ataque com a solução de 0,5 % de HF, a micrografia da matriz de alumínio é evidenciada com bom refino de grão, como mostrado na Figura 36. Na Figura 37, é mostrada uma micrografia do compósito.

Figura 36 - Alumínio matriz com ampliação de 100 x.

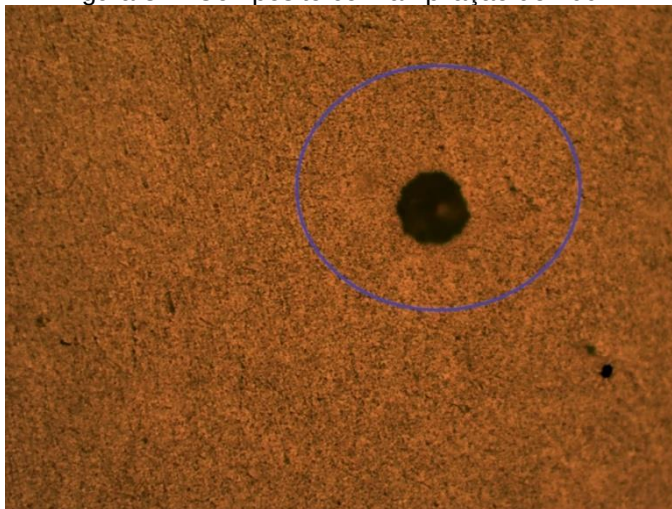


Fonte: Autor.

A partir da Figura 36, é possível identificar que não são tão presentes defeitos estruturais na matriz de alumínio. Destacados em círculos azuis são as possíveis formações dos intermetálicos $\text{FeMg}_3\text{Si}_6\text{Al}_8$, Fe_3SiAl_9 ou $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ comuns para essa composição a base de silício, magnésio e ferro (DAVIS, 1993).

Para o compósito, uma micrografia com magnificação de 100 x é mostrada na Figura 37.

Figura 37 - Compósito com ampliação de 100 x.

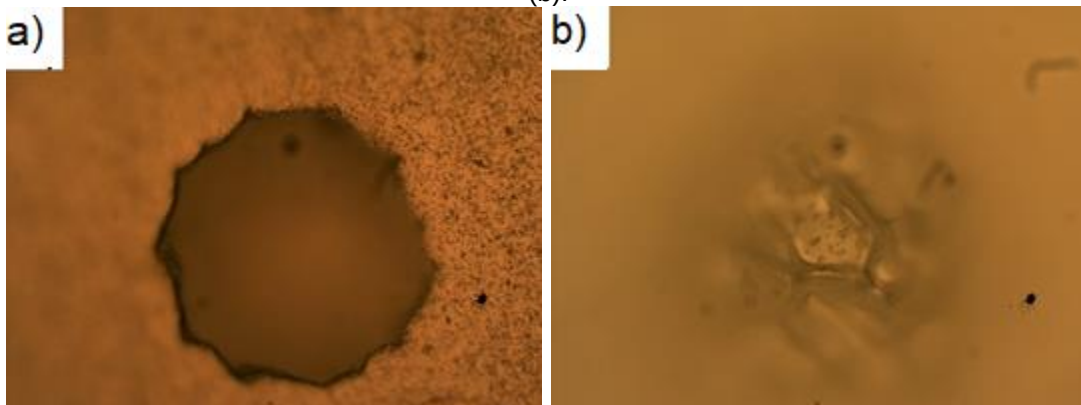


Fonte: Autor.

Arango e Martorano (2009) notaram que após a introdução de um inoculante cerâmico, houve um melhor refino de grão a partir da liga base. Assim como também outros inoculantes cerâmicos podem atuar refinando a estrutura do material, algo visível na região interna do círculo azul na Figura 37. É possível que essas características sejam provenientes de um defeito de fabricação como um vazio por gases ou pela expulsão por lixamento e polimento dessa possível partícula.

A Figura 38 apresenta 2 focalizações diferentes, a fim de abranger uma maior qualidade focal.

Figura 38 - Compósito em ampliação de 500 x em 2 posições focais, no plano (a), e acima do plano (b).



Fonte: Autor.

Para a primeira posição focal, parte A) da Figura 38, a posição focal está próxima ao plano metálico, onde há uma pequena variação no padrão de solidificação nos arredores da possível partícula. Já no que tange à parte B) da Figura 38, o foco

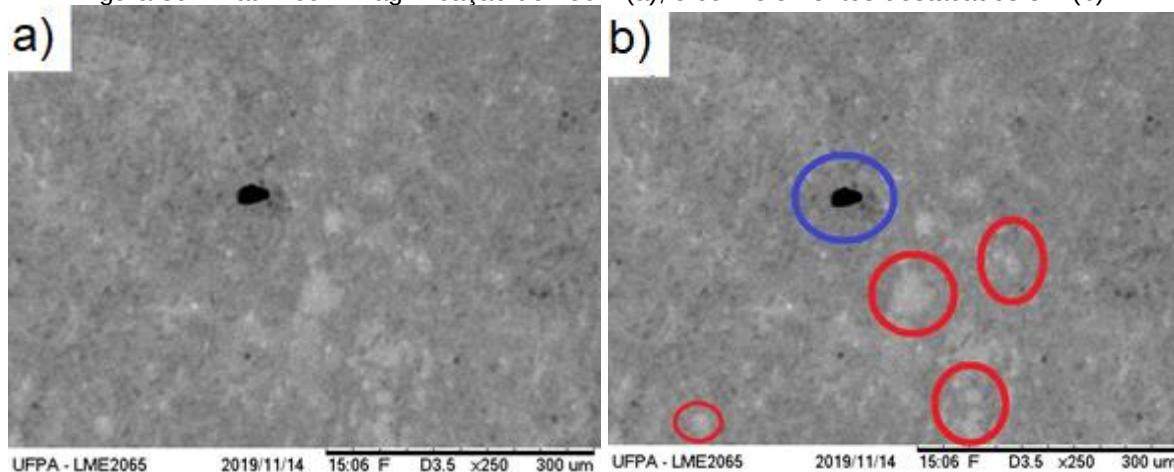
fora ajustado para acima do plano metálico, onde é notado um material com aspecto vítreo na sua superfície focal com pequenas ranhuras, as quais podem ser indícios de corrosão pelo ácido fluorídrico utilizado no ataque.

Para Garcia (2007), este rearranjo no padrão de solidificação na região adjacente da partícula pode ser considerada como uma inoculação de nucleante, neste caso, o carbetto de silício, que ao enfrentar uma diferente taxa de resfriamento, entre o alumínio fundido e o material cerâmico, pode ter vindo a induzir um maior refino neste local em específico.

4.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

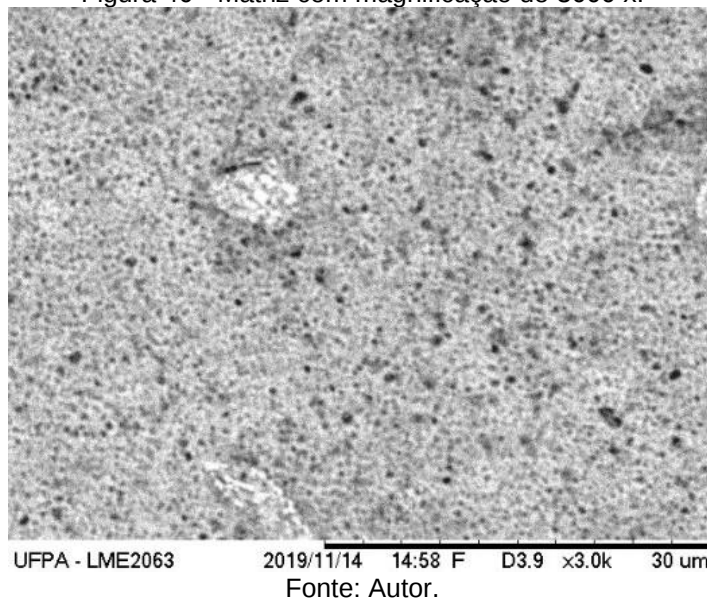
A microscopia eletrônica de varredura foi realizada e como resultado foi gerada a Figura 39 com o aumento de 250 x e a Figura 40 com o aumento de 3000 x para a matriz, e para o compósito a Figura 41.

Figura 39 - Matriz com magnificação de 250 x (a), e com elementos destacados em (b).



Fonte: Autor.

Figura 40 - Matriz com magnificação de 3000 x.

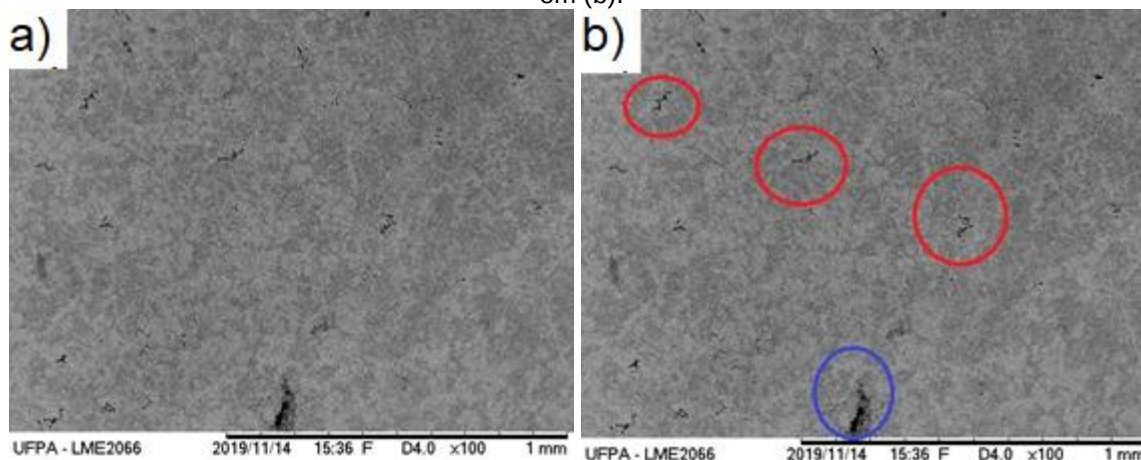


A partir da visualização das micrografias da matriz mostradas na Figura 39, especificamente na parte b), é possível notar que há uma diferença de microconstituintes, destacados em círculos vermelhos, possivelmente um intermetálico constituído de alumínio, silício, magnésio e ferro segundo o que foi descrito por Davis (1993). Há também um possível defeito de inclusão, Sharma *et al.* (2017) trata isso como uma dificuldade a ser contornada no método de fabricação de *Stir Casting*.

Na Figura 40, com a magnificação de 3000 x, é notada uma alta concentração de porosidades, tal fato também pode ser decorrente do método de fabricação, mas também sendo possível se atribuir a solubilidade do hidrogênio no alumínio, algo que poderia ser resolvido por uma melhor degaseificação (BLACK; KOHSER, 2012).

Na Figura 41 e Figura 42, é possível visualizar a micrografia do compósito com diferentes aumentos, 100 e 2000 x respectivamente.

Figura 41 - Micrografia do compósito com magnificação de 100 x (a), e com elementos destacados em (b).

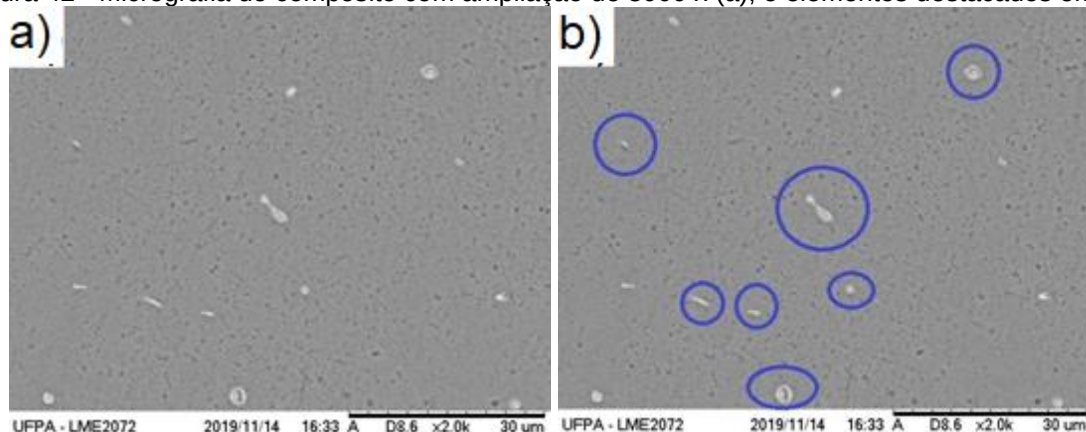


Fonte: Autor.

A partir da visualização da micrografia é possível notar um possível defeito de fabricação, destacados no círculo azul na parte b) da Figura 41. Possíveis aglomerados do carбето de silício, ou de inclusões de escória são destacados em vermelho, também é possível notar que esses aglomerados são presentes por grande parte da superfície do compósito.

Tais estruturas são semelhantes ao que foi encontrado por Mahajan *et al* (2015). É notada uma boa dispersão destes possíveis aglomerados de SiC em meio à matriz, isso pode estar correlacionado com a agitação forçada na técnica de *Stir Casting*, a qual auxiliaria na dispersão das partículas na fase contínua, mas ainda podendo ser possíveis inclusões de escória dentro do metal fundido (MEENA *et al.*, 2013).

Figura 42 - Micrografia do compósito com ampliação de 3000 x (a), e elementos destacados em (b).



Fonte: Autor.

Visualizando-se a Figura 42, foram notados pequenos pontos esbranquiçados, destacados na parte B) da Figura 42, o que podem ser evidências de partículas do carvão de silício disperso em meio a matriz metálica de alumínio.

Destacados com círculos azuis, são estruturas semelhantes as encontradas por Abarghouie e Reihani (2010) e também por Moses, Dinaharan e Sekhar (2014). A Figura 42 também foi utilizada como base para a geração da análise por EDS, mostrada posteriormente no tópico 4.4.2

4.4 Caracterização Química

4.4.1 Caracterização Química por Fluorescência de Raios X

O Quadro 5 mostra a quantidade de cada elemento presente nos materiais utilizados neste trabalho.

Quadro 5 - Resultados do FRX dos Materiais.

Elemento Químico	Matriz	Compósito
Al	94,93	94,51
Mg	1,44	1,34
Si	3,40	3,91
Fe	0,22	0,24
Elementos Traços	<0,001	<0,001

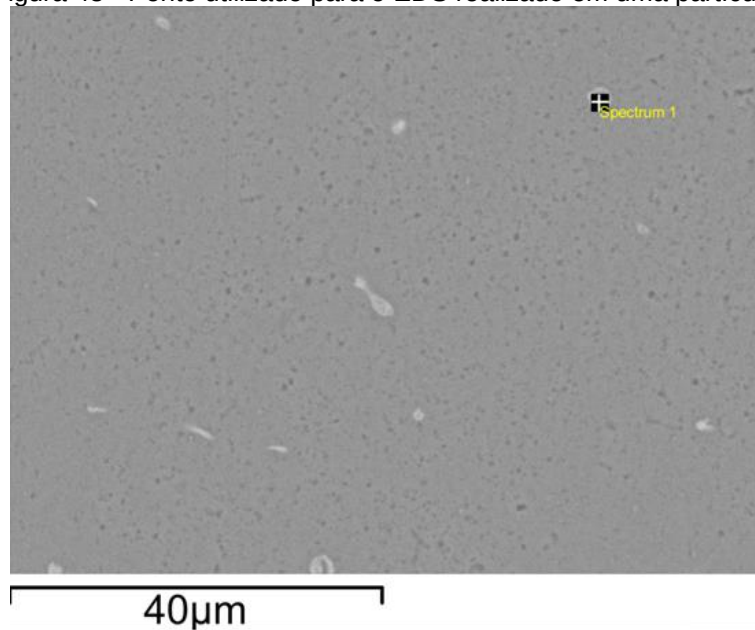
Fonte: Autor.

Nesta análise foram reveladas somente teores significativos da presença de Alumínio, Magnésio, Ferro e Silício no alumínio da matriz e no compósito. A partir desta composição química da matriz, foi possível inferir-se que a liga apresentou similaridades com a AA 4013, uma liga com médio teor de silício e magnésio. Pertencente a série 4xxx, esse material pode ser utilizado como elemento de enchimento em brasagens, e para outras aplicações caso sejam feitos tratamentos térmicos (DAVIS, 1993).

4.4.2 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS)

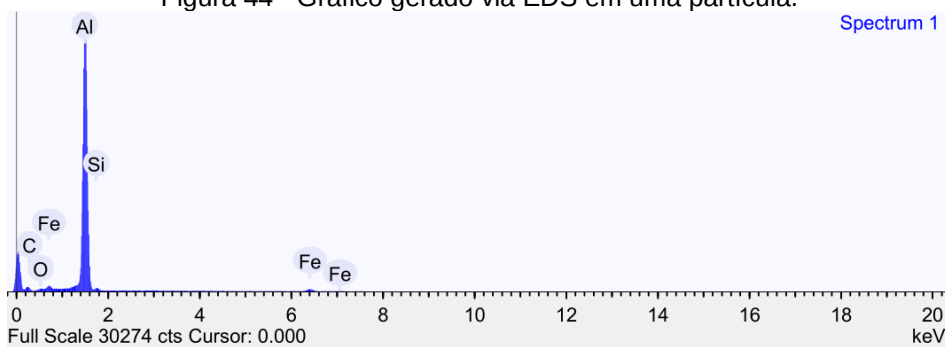
A partir da Figura 43 a análise da espectroscopia de raios X por dispersão em energia mostrou os seguintes resultados observados na Figura 44 e no Quadro 6.

Figura 43 - Ponto utilizado para o EDS realizado em uma partícula.



Fonte: Autor.

Figura 44 - Gráfico gerado via EDS em uma partícula.



Fonte: Autor.

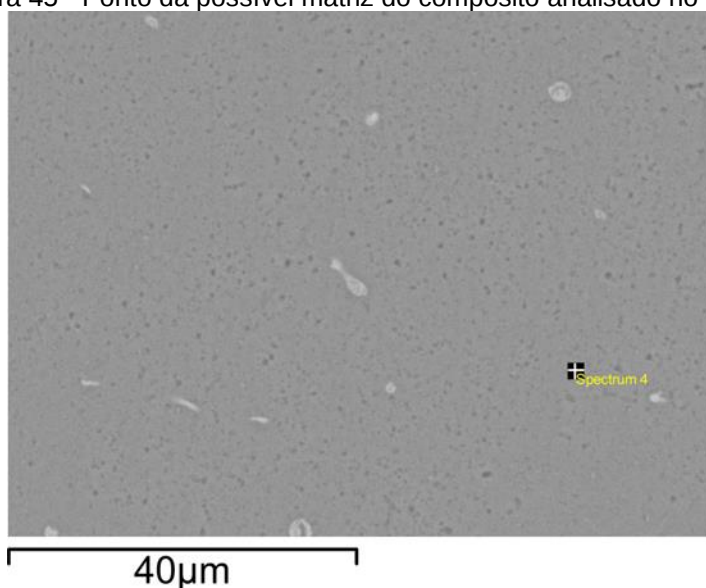
Quadro 6 - EDS na possível partícula de SiC do compósito.

Elemento	Porcentagem Mássica (%)	Porcentagem Atômica (%)
Carbono	20,801	37,077
Oxigênio	3,688	4,935
Alumínio	69,434	55,094
Silício	1,489	1,135
Ferro	4,588	1,759

Por meio dos resultados apresentados no gráfico da Figura 44, e em combinação com o Quadro 6, foi possível notar pequenas proporções de Silício e Ferro em meio ao restante dos elementos analisados.

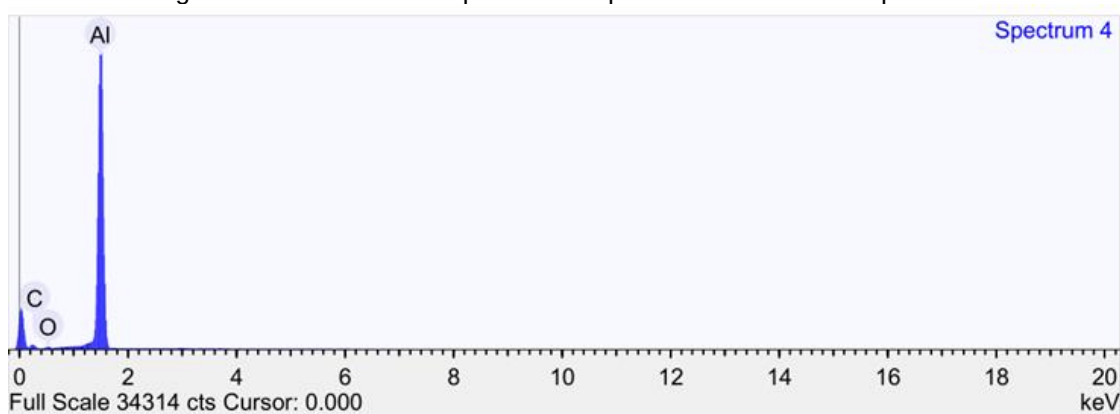
A Figura 45 ilustra o ponto analisado para a comparação de concentração de elementos no compósito. A Figura 46 e o Quadro 7 mostrando os resultados obtidos.

Figura 45 - Ponto da possível matriz do compósito analisado no EDS



Fonte: Autor.

Figura 46 - Gráfico obtido por EDS da possível matriz do compósito.



Fonte: Autor.

Quadro 7 - EDS na possível matriz do compósito.

Elemento	Porcentagem Mássica (%)	Porcentagem Atômica (%)
Carbono	21,208	37,141
Oxigênio	2,682	3,526
Alumínio	76,110	59,333

Fonte: Autor.

A partir da análise do gráfico da Figura 46 e do Quadro 7, foi possível notar que esta região é composta quase que exclusivamente de Alumínio, Oxigênio e Carbono.

E fazendo a comparação entre os dados obtidos entre a possível matriz e possível partícula, foi possível visualizar-se que há uma clara distinção da concentração e espécie de elementos formadores da fase observada em cada ponto. Sendo que na hipotetizada partícula, ponto analisado na Figura 43, há uma presença de Silício e Ferro, uma provável evidência do SiC, se feita em contraste com o ponto analisado na Figura 45, onde não se apresentam tais elementos.

Além disso, é importante discutir a possível evidência falsa de carbono nas amostras, o que pode ter sido deturpado por pequenas amostras orgânicas provenientes do manuseio ou até dos gases presentes na atmosfera de vácuo parcial da câmara do MEV (ABRUNHOSA; PINTO, 2012). As amostras apresentam teores baixos de oxigênio que pode ter sido originado da formação de finas camadas de óxido na superfície dos materiais a base de alumínio (SCICAST, 2018).

4.4.3 Análise por Lixiviação Ácida

A lixiviação ácida foi realizada e como esperado, houve uma grande liberação gasosa quando a solução ácida entrou em contato com a região metálica dos materiais, como mostrado na Figura 47. E explicado pela reação descrita na equação 6.



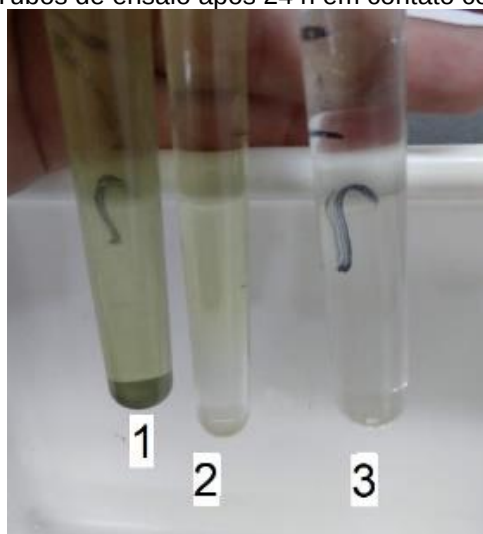
Figura 47 - Ataque ácido no alumínio



Fonte: Autor.

Após o ataque ácido, foi notado uma formação de soluções amarelo-esverdeadas nos tubos de ensaio onde há o carbetto de silício e nos que contém o compósito, mostrado na Figura 48, sendo conteúdo dos tubos os seguintes: para o primeiro, uma amostra do pó de carbetto de silício; para o segundo, uma amostra do compósito; para o terceiro, uma amostra do alumínio.

Figura 48 - Tubos de ensaio após 24 h em contato com a solução.



Fonte: Autor.

Essa coloração pode ser decorrente da formação de cloreto férrico (FeCl_3) que é formado após o ataque do ácido clorídrico em pequenas frações de ferro presentes no carbetto de silício (ATKINS; JONES, 2011). Tal formação é explicada pela equação 7.



Essa reação tem prioridade menor do que a formação do cloreto de alumínio por conta da ordem de reatividade do alumínio ser maior a do íon Fe^{2+} e do Fe^{3+} .

Além dessa análise qualitativa, foi feita também uma análise do percentual lixiviado pelo ácido. O Quadro 8 apresenta o resultado da lixiviação utilizando-se a equação 4.

Quadro 8 - Perda mássica após lixiviação

Amostra	Porcentagem Mássica após lixiviação(%m/m)
Carbeto de Silício	98,188 ± 0,740
Compósito	1,459 ± 0,045
Alumínio Matriz	0,019 ± 0,010

Fonte: Autor.

Observando-se o Quadro 8, foi notado que há uma perda quase que total de massa no alumínio matriz e no compósito também. Entretanto, há uma mínima perda de material nas amostras do pó de carbeto de silício e também, o aspecto de partículas escuras no material residual na amostra do compósito pode estar indicando que o carbeto de silício é resistente ao ataque químico, como esperado de um material cerâmico com suas aplicações algo consonante com o que Andrews *et al.* (2007) pesquisou, e que seu grau de degradação pode estar relacionado com suas possíveis impurezas.

4.5 Estimativa da porcentagem de reforço incorporada na matriz

A partir dos procedimentos presentes no tópico 3.8 realizados são apresentados os seguintes resultados mostrados no Quadro 9.

Quadro 9 - Proporções em massa específica para os materiais.

Amostra	Picnometria	Princípio de Arquimedes em Proveta
Carbeto de Silício	3,138 ± 0,015	3,150 ± 0,170
Alumínio Matriz	2,707 ± 0,021	2,711 ± 0,168
Compósito	2,719 ± 0,019	2,727 ± 0,050

Fonte: Autor.

É visto, que a massa específica do carbeto de silício tem valor aproximado com o que é determinado por ASM INTERNATIONAL (1990), de cerca de 3,2 g.cm⁻³. Notadamente, esse valor ligeiramente menor, pode ser motivado pela presença de impurezas no material.

Quanto a massa específica do Alumínio, matriz, e do Compósito, os resultados são coerentes com os de Kumar, Manisekar e Ravindran (2014), que obtiveram um pequeno acréscimo de massa específica ao adicionar-se pequenas frações de carbeto de silício em uma matriz a base de alumínio.

Foi notado que há um teor médio, em proporção, de aproximadamente 0,5 % de Carbetto de Silício no Compósito. Essa baixa incorporação pode ser explicada pelo baixo ângulo de contato entre metais em geral, e, especificamente, entre o alumínio e o carbetto de silício (SHIMBO; NAKA; OKAMOTO, 1989).

Há, porém, a possibilidade de aumentar-se esse teor de Carbetto de Silício na matriz de Alumínio aumentando-se o tempo de contato com o metal fundido, conforme Ferro e Derby (1995) obtiveram na faixa de temperatura de 700 a 1100 ° C, entretanto, é importante frisar que essa melhor incorporação e, conseqüente, molhabilidade entre estes compostos, pode ser explicada pela formação de Al_4C_3 (NOGI; OGINO, 1988). Tal fase é facilmente atacada por ácidos gerando metano (CH_4) e cloreto de alumínio ($AlCl_3$), quando em presença de ácido clorídrico (HCl) e decompõe-se em cerca de 1400 ° C (EAGLESON, 1994).

4.6 Condutância Elétrica

A resistividade elétrica medida e calculada pela equação 5 é mostrada no Quadro 10.

Quadro 10 - Resultado da resistividade elétrica medida.

Material	Condutância (% IACS)
Alumínio	62 %
Compósito	55,31 %

Fonte: Autor.

Foi notado uma redução na condutância no compósito em relação ao alumínio comercial, tal aumento pode ser explicado pelo caráter de mau condutor elétrico do carbetto de silício, mostrado por Volz *et al.* (2001), em que a resistividade elétrica do carbetto de silício tem resistividade equivalente a cerca de $10^{11} \Omega.m$. Uma possível explicação desse fenômeno também pode ser o refino de grão presente no material compósito, de forma que os contornos de grão podem agir como barreiras para a transmissão elétrica (PRAZERES, 2016).

Também é notado aumento similar na resistividade quando há incorporação de outro sistema particulado de material semicondutor na matriz metálica (DUROWOJU *et al.*, 2015).

4.7 Ensaios Mecânicos

4.7.1 Ensaios de Microdureza

O ensaio de microdureza gerou os resultados que são sintetizados pelo Quadro 11.

Quadro 11 - Medidas de microdureza para a matriz e o compósito.

Material	Dureza (VHN)
Alumínio	14,85 ± 2,24
Compósito	15,70 ± 1,84

Fonte: Autor.

Nota-se que houve um pequeno aumento de 0,85 VHN na medida de microdureza, porém este aumento não é significativo o suficiente devido ao valor desvio padrão estar acima deste. Concomitantemente é necessário frisar que ainda ocorreu um aumento, e por conta da adição do carбето de silício ter sido em uma baixa porcentagem em relação a bibliografia utilizada, além de ser feita com método de fabricação ligeiramente menos efetivo.

Mahajan *et al.* (2015) obteve cerca de 72 VHN com um compósito de uma liga Al 6061 com 10 % de Carбето de Silício em comparação aos 45 VHN da mesma liga. Meena *et al.* (2013) obteve uma tendência de melhor reforço para o desempenho com o carбето de silício em tamanho passante à malha de 220 mesh, o que pode ser explicado pela possível indentação em uma partícula do carбето de silício, aumentando, assim a resistência do material pontualmente, mas também podendo gerar possíveis acúmulos.

Outros autores como Singla *et al.* (2009), Kumar, Maniesekar e Ravindran (2014) e Meena *et al.* (2013) obtiveram bons desempenho utilizando-se de ensaios de dureza Brinell, tal fato pode ser devido à possível interação maior entre a superfície do indentador e a do carбето de silício, aumentando assim, a dureza do material.

Um método possível de obter-se uma melhoria no desempenho do compósito seria por um tratamento térmico como envelhecimento, a fim de aliviar as tensões criadas durante a solidificação diferenciada entre a matriz e o reforço como realizado por Abarghouie e Reihani (2010).

Para um aumento maior ser notado é recomendada a utilização de ensaios de dureza Brinell, como realizado por Singla *et al.* (2009), Kumar, Manisekar e Ravindran (2014) e Meena *et al.* (2013).

4.7.2 Ensaios de Tração

Os resultados do ensaio de tração sob recomendação da norma NBR 5118 – 1985 (ABNT, 1985) são mostrados no Quadro 12.

Quadro 12 - Resultado dos ensaios de tração.

Material	Tensão Máxima (MPa)	Desvio (MPa)
Matriz (Al)	158,09	± 1,83
Compósito (Al5%SiC)	167,59	± 0,73

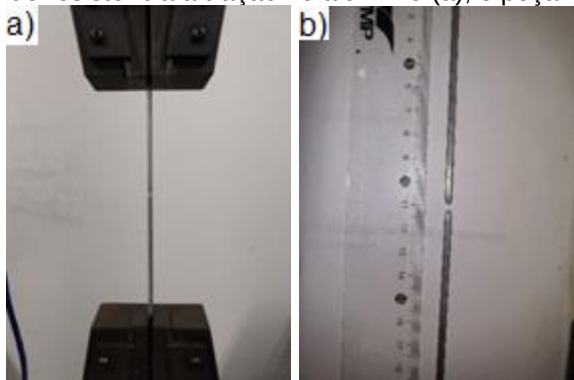
Fonte: Autor.

O acréscimo na resistência do material sob tensão quando inseridas partículas duras é notado em trabalho de Radhika, Balaji e Palaniappan (2015), e segue a linha de tendência mostrada por Moses, Dinaharan e Sekhar (2014).

Esse visível aumento de resistência à tração pode ser em função da transferência de carga da matriz para o material utilizado como reforço, além do carbetto de silício talvez estar agindo como um refinador de grão, o que leva a uma maior resistência no material (SHARMA *et al.*, 2017).

O comportamento mecânico do material durante o ensaio foi de haver a formação de estrição para ambas as composições, como visto nas Figura 49 para o alumínio matriz, sendo na parte a) o momento antes do rompimento e na parte b), o registro após o rompimento.

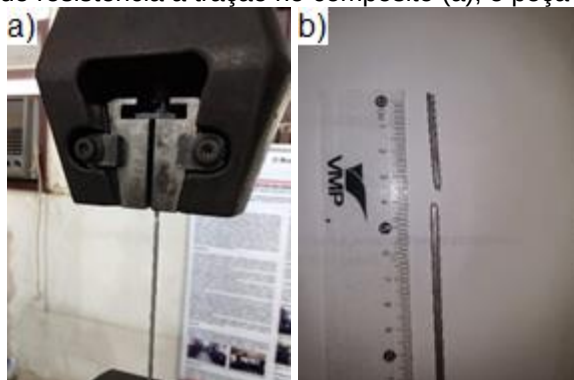
Figura 49 - Ensaio de resistência à tração no alumínio (a), e peça rompida (b).



Fonte: Autor.

A Figura 50 mostra o desenvolvimento da deformação do compósito antes da fratura na parte a), e na parte b), é notada a peça após o rompimento.

Figura 50 - Ensaio de resistência à tração no compósito (a), e peça rompida (b).



Fonte: Autor.

É notado um comportamento de empescoçamento do material em momentos antes do rompimento, o que evidencia que há um comportamento de boa ductibilidade dos materiais estudados, tanto da matriz quanto do compósito. Para maiores teores de carbeto de silício na matriz de alumínio, existe a tendência de haver menor deformação no material, tornando-o proporcionalmente mais frágil conforme o teor de carbeto de silício é aumentado (SKOLIANOS, 1996).

5. CONCLUSÕES

- A fundição do alumínio e a adição do carбето de silício foi realizada. Seguidamente, houve a usinagem e laminação do material. Foram feitas diferentes amostras a partir do metal base e do compósito.

- Analisando-se a difratometria do pó de carбето de silício, são notadas apenas picos representativos de Carбето de Silício Alfa.

- A partir da metalografia do material, pode-se inferir que as partículas de carбето de silício influenciaram a solidificação a fim de se formarem grãos mais refinados, apesar de induzirem a defeitos de fabricação como vazios e incrustações. O ataque durante a metalografia pode ter sido um agente de corrosão sobre as partículas de carбето de silício no compósito por conta da alta afinidade do íon F^- com os componentes do compósito.

- A caracterização química por FRX do material mostra um incremento na quantidade de Silício e Ferro no material e há a possibilidade deste acréscimo ser decorrente da adição do Carбето de Silício. O EDS mostra que há uma maior concentração de Silício e Ferro em áreas onde há a hipótese de serem partículas de SiC. A estimativa da incorporação final do carбето de silício foi de cerca de 0,5 % em relação à massa total do compósito.

- Para o comportamento elétrico do material, é criada uma resistência elétrica que culmina na redução de cerca 12 % da condutância para o compósito em relação ao alumínio matriz, isso pode ser decorrência do refino de grão, quanto da introdução de um material menos condutor elétrico.

- No que tange à resistência mecânica do material, é notado um aumento de cerca de 5,7 % em relação à microdureza e 6 % para a resistência a tração.

- Partindo-se da hipótese inicial de que o método manual de agitação seria de desempenho inferior que o de *Stir Casting*, pode-se inferir que houve um bom desempenho em geral para esta composição. Entretanto, é visto que há uma melhoria na resistência mecânica do material compósito no que tange a aumento do limite de resistência à tração, e também em relação a microdureza. A condutância do material compósito foi inferior à matriz sem reforço.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

As sugestões para o trabalho são:

- A utilização do método de fabricação por *Stir Casting* efetivamente com controle de agitação mecanizado.
- Mudar a concentração de carbetos de silício na matriz e caracterizar.
- Variar o tamanho de partícula do reforço e comparar as propriedades.
- Realizar outros ensaios mecânicos no material como Dureza Brinell, compressão, cisalhamento e impacto.
- Estudar outras ligas de alumínio reforçadas por carbetos de silício.
- Realizar os experimentos fabricando os materiais por metalurgia do pó.

REFERÊNCIAS

- ABARGHOUIE, S.M.R. Mousavi; REIHANI, S.M. Seyed. Aging behavior of a 2024 Al alloy-SiCp composite. **Materials & Design (1980-2015)**, [s.l.], v. 31, n. 5, p.2368-2374, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.063>.
- ABRUNHOSA, Ana; PINTO, Dulcineia B. O Contributo das análises metalográficas na caracterização cultural e estilística de adornos metálicos da Idade do Ferro. O caso do Crasto de Palheiros - Murça / Norte de Portugal. **Estudos Arqueológicos de Oeiras**, Oeiras, v. 0000, n. 19, p.13-18, jan. 2012.
- ALANEME, Kenneth Kanayo; SANUSI, Kazeem Oladiti. Microstructural characteristics, mechanical and wear behaviour of aluminium matrix hybrid composites reinforced with alumina, rice husk ash and graphite. **Engineering Science And Technology, An International Journal**, v. 18, n. 3, p.416-422, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2015.02.003>.
- ALFAIA, Mauro Ângelo Oliveira de. **Estudo do efeito do tratamento térmico sobre uma liga Al-Cu-Fe modificada com Zr solidificada em molde formato “U” destinada a transmissão (T X) e a distribuição (D X) de energia elétrica**. 2016. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B873 – 17**: Standard Test Method for Measuring Volume of Apparent Density Cup Used in Test Methods B212, B329, and B417. West Conshohocken: Astm, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7481 – 18**: Standard Test Methods for Determining Loose and Tapped Bulk Densities of Powders using a Graduated Cylinder. West Conshohocken, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384 – 17**: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken: Astm, 2017.
- ANAND, S. Hanish; SRIBALAJI, R; AKLIESH, R Kiran Kumar. Fabrication and Mechanical Testing of MMC Formed by Reinforcement of SiO₂, Graphite & Fly Ash in Aluminium LM06. **International Journal Of Advanced Research In Management, Architecture, Technology And Engineering**. Chennai, p. 31-36. mar. 2016.
- ANDREWS, A. et al. Electrochemical corrosion of solid and liquid phase sintered silicon carbide in acidic and alkaline environments. **Journal Of The European Ceramic Society**, [s.l.], v. 27, n. 5, p.2127-2135, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.07.011>.

ARSENAULT, R.j.; PANDE, C.s.. Interfaces in metal matrix composites. **Scripta Metallurgica**, [s.l.], v. 18, n. 10, p.1131-1134, out. 1984. Elsevier BV.
[http://dx.doi.org/10.1016/0036-9748\(84\)90192-3](http://dx.doi.org/10.1016/0036-9748(84)90192-3).

ARANGO, Juan Marcelo Rojas; MARTORANO, Marcelo Aquino. Estudo do refino de grão de ligas Al-Si através de inoculantes do sistema Al-Ti-B. In: CONGRESSO DE FUNDIÇÃO, 14., 2009, São Paulo. **24**. São Paulo: Abifa, 2009. p. 1 - 12.

ASHBY, Michael F.; JONES, David R. H. **Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design**. 3. ed. Oxford: Butterworth-heinemann, 2005.

ASM INTERNATIONAL. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. Materials Park: Asm International, 1990.

ASM INTERNATIONAL. **Metallography and Microstructures**. Materials Park: Asm International, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5118 - 1985: FIOS DE ALUMÍNIO NUS DE SEÇÃO CIRCULAR PARA FINS ELÉTRICOS**. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5285 - 1985: Fios de alumínio-liga, nus, de seção circular, para fins elétricos**. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6814 - 1986: Fios e cabos elétricos - Ensaio de resistência elétrica**. São Paulo: Abnt, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Características Físicas e Químicas**. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

ATKINS, Peter; JONES, Loretta. **Princípios da Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BERTHIER, Pierre. Analyse de l'alumine hydratée des Beaux, département des Bouches-du-Rhône. **Annales Des Mines**. Paris, abr. 1821. p. 531-534. Disponível em: <https://patrimoine.mines-paristech.fr/document/Annales_Mines_1821_S01_06#?c=0&m=0&s=0&cv=269&z=558.6638%2C-161.1586%2C2605.7082%2C1700>. Acesso em: 17 set. 2019.

BLACK, J T.; KOHSER, Ronald A.. **DeGarmo's MATERIALS AND PROCESSES IN MANUFACTURING**. 11. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

BRESCIANI FILHO, E. **Conformação plástica dos metais**. São Paulo: Epusp, 2011.

CALLISTER JUNIOR, William D; RETHWISCH, David G. **MATERIALS SCIENCE and ENGINEERING: An Introduction**. 9 th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

CEBALLOS-MENDIVIL, L.g. *et al.* Synthesis and Characterization of Silicon Carbide in the Application of High Temperature Solar Surface Receptors. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 57, p.533-540, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.207>.

CUNHA, Edinaldo José de Sousa. **Influência do uso de resíduo do processo bayer nas propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de base polimérica reforçados com fibra de curauá (*Ananas lucidus. mill*)**. 2015. 152 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

DAVIS, J.R. **Aluminum and aluminum alloys**: Asm specialty handbook. Materials Park: Asm International, 1993.

DIAS, Whellisson da Silva. **Análise Da Influência Do Tratamento Térmicos Na Liga Al-0,05%Cu- [0,35 -0,45]%Fe Modificada Com Dois Teores De Zircônio Solidificada Em Coquilha Metálica**. 2016. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

DROZDOV, Andrey. **Aluminium**: The Thirteenth Element. Moscow: Rusal, 2007.

DUROWOJU, M.O. *et al.* Spark plasma sintering of graphite–aluminum powder reinforced with SiC/Si particles. **Powder Technology**, v. 284, p.504-513, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.07.027>.

EAGLESON, Mary. **Concise Encyclopedia Chemistry**. Berlin: Walter de Gruyter, 1994.

FALIN, Aleksey *et al.* Mechanical properties of atomically thin boron nitride and the role of interlayer interactions. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, 22 jun. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms15815>.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

FERRO, A.c.; DERBY, B.. Wetting behaviour in the Al-Si/SiC system: interface reactions and solubility effects. **Acta Metallurgica Et Materialia**, [s.l.], v. 43, n. 8, p.3061-3073, ago. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0956-7151\(95\)00014-m](http://dx.doi.org/10.1016/0956-7151(95)00014-m).

GARCIA, Amauri. **Solidificação**: Fundamentos e Aplicações. 2. ed. Campinas: Editora Unicamp, 2007.

GENTILE, Marialuisa; XIAO, Ping; ABRAM, Tim. XRD and TG-DSC Analysis of the Silicon Carbide-Palladium Reaction. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE AND**

EXPO ON ADVANCED CERAMICS AND COMPOSITES, 37 th., 2013, Daytona Beach. The American Ceramic Society, 2013.

GIREESH, Ch. Hima *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. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.571>.

HABIBNEJAD-KORAYEM, M.; MAHMUDI, R.; POOLE, W.J. Enhanced properties of Mg-based nano-composites reinforced with Al₂O₃ nano-particles. **Materials Science And Engineering: A**, v. 519, n. 1-2, p.198-203, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2009.05.001>.

KELLY, A.; TYSON, W. R. Tensile properties of fibre-reinforced metals: Copper/tungsten and copper/molybdenum. **Journal Of The Mechanics And Physics Of Solids**, v. 13, n. 6, p.329-350, dez. 1965. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-5096\(65\)90035-9](http://dx.doi.org/10.1016/0022-5096(65)90035-9).

KUMAR, S Vinoth; MANISEKAR, K; RAVINDRAN, P. Development and Tribological Performance of nano SiC particles on the AA 2024 Hybrid Composites with the Addition of nano Graphite. In: INTERNATIONAL & 26 TH ALL INDIA MANUFACTURING TECHNOLOGY, DESIGN AND RESEARCH CONFERENCE, 5., 2014, Guwahati. **173**. Guwahati: lit, 2014. p. 1 - 6.

LEE, J. D. **Química inorgânica não tão concisa**. Tradução da 5ª ed. inglesa. Editora Edgard Blücher. 1999.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas & minerais Industriais: usos e especificações**. 2.Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008

MAHAJAN, Gaurav *et al.* Analysis of Microstructure, Hardness and Wear of Al-SiC-TiB₂ Hybrid Metal Matrix Composite. **Indian Journal Of Science And Technology**, v. 8, n. 2, p.101-105, 1 jan. 2015. Indian Society for Education and Environment. <http://dx.doi.org/10.17485/ijst/2015/v8is2/59081>.

MATIKAS, Theodore E.; HASAN, Syed T. Deformation Characteristics of Aluminium Composites for Structural Applications. **Recent Trends In Processing And Degradation Of Aluminium Alloys**, p.347-384, 21 nov. 2011. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/21147>.

MEENA, K.I. *et al.* An Analysis of Mechanical Properties of the Developed Al/SiC-MMC's. **American Journal Of Mechanical Engineering**, v. 1, n. 1, p.14-19, 31 jan. 2013. Science and Education Publishing Co., Ltd. <http://dx.doi.org/10.12691/ajme-1-1-3>.

MIessler, Gary L.; FISCHER, Paul J.; TARR, Donald A. **Química inorgânica**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education, 2014.

MOLINA, J.M. *et al.* The surface tension of liquid aluminium in high vacuum: The role of surface condition. **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, v. 27, n. 5, p.394-401, jul. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2006.09.006>.

MOSES, J. Jebeen; DINAHARAN, I.; SEKHAR, S. Joseph. Characterization of Silicon Carbide Particulate Reinforced AA6061 Aluminum Alloy Composites Produced via Stir Casting. **Procedia Materials Science**, v. 5, p.106-112, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.247>.

MONTEIRO, Claudio Clayer; FARIAS, Victor Melo. Alumínio. In: KARINA ANDRADE MEDEIROS (Org.). **SUMÁRIO MINERAL**: 2017. Brasília: Anm, 2018. p. 54-56.

NOGI, Kiyoshi; OGINO, Kazumi. Wettability of Sic by Liquid Pure Metals. **Transactions Of The Japan Institute Of Metals**, v. 29, n. 9, p.742-747, 1988. Japan Institute of Metals. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans1960.29.742>.

PEARSON, T. G.; PHILLIPS, H. W. L. THE PRODUCTION AND PROPERTIES OF SUPER-PURITY ALUMINIUM. **Metallurgical Reviews**, v. 2, n. 1, p.305-360, jan. 1957. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/mtlr.1957.2.1.305>.

PRASAD, Dora Siva; KRISHNA, A. Rama. Production and Mechanical Properties of A356.2 /RHA Composites. **International Journal Of Advanced Science And Technology**, Hobart, v. 33, p.51-58, jan. 2011.

PRAZERES, Emerson Rodrigues. **Avaliação da modificação da liga base Al – Cu – Fe – Mg por teores de Ni e Ti quanto a caracterização estrutural, elétrica e mecânica, a partir de ligas solidificadas em molde “U”**. 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

RADHIKA, N.; BALAJI, V. T.; PALANIAPPAN, S. Studies on mechanical properties and tribological behaviour of LM25/SiC/Al₂O₃ composites. **Journal Of Engineering Science And Technology**, Subang Jaya, v. 10, n. 2, p.149-159, fev. 2015

RAHMAN, M. D. Habibur; RASHED, H. M. Mamun Al. Characterization of Silicon Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composites. **Procedia Engineering**, v. 90, p.103-109, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.821>.

RASIDHAR, Lanka; RAO, C.H Srinivasa; KRISHNA, A. Rama. Fabrication and investigation on properties of Ilmenite (FeTiO₃) based al-nanocomposite by stir casting process. **International Journal Of Bio-science And Bio-technology**. Seul, p. 193-199. ago. 2013.

RIETVELD, H. M.. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. **Journal Of Applied Crystallography**, [s.l.], v. 2, n. 2, p.65-71, 2 jun. 1969. International Union of Crystallography (IUCr). <http://dx.doi.org/10.1107/s0021889869006558>.

RIGAKU. **Features of the MiniFlex600**. Disponível em: <<https://www.rigaku.com/en/products/xrd/miniflex/app/1049>>. Acesso em: 26 out. 2019.

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. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1979.tb12734.x>.

SCICAST. Deviante. **SciCast #263**: Metalurgia. 2018. [Locução de]: Roberto Spinelli e Iuri de Barros: Scicast, 20 jul. 2018. *Podcast*. Disponível em: <<https://www.deviante.com.br/podcasts/scicast-263/>>. Acesso em: 17 set. 2019.

SHACKELFORD, James F. Metais. **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros**. 6ª ed. São Paulo: Pearson Education, 2008.

SHARMA, Rohit *et al.* A Review of the Aluminium Metal Matrix Composite and its Properties. **International Research Journal Of Engineering And Technology**. Samalkha, p. 832-842. fev. 2017.

SHIMBO, M.; NAKA, M.; OKAMOTO, I.. Wettability of silicon carbide by aluminium, copper and silver. **Journal Of Materials Science Letters**, [s.l.], v. 8, n. 6, p.663-666, jun. 1989. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf01730435>.

SIJO, M.t.; JAYADEVAN, K.r.. Analysis of Stir Cast Aluminium Silicon Carbide Metal Matrix Composite: A Comprehensive Review. **Procedia Technology**, [s.l.], v. 24, p.379-385, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.052>.

SINGLA, Manoj *et al.* Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite. **Journal Of Minerals And Materials Characterization And Engineering**, [s.l.], v. 08, n. 06, p.455-467, 2009. Scientific Research Publishing, Inc., <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2009.86040>.

SKOLIANOS, Stefanos. Mechanical behavior of cast SiCp-reinforced Al-4.5%Cu-1.5%Mg alloy. **Materials Science And Engineering: A**, [s.l.], v. 210, n. 1-2, p.76-82, jun. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)10043-1](http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093(95)10043-1).

SUBRAHMANYAM, A. P. S. V. R.; NARSARAJU, G.; RAO, B. Srinivasa. Effect of Rice Husk ash and Fly ash Reinforcements on Microstructure and Mechanical properties of Aluminium alloy (AlSi10Mg) Matrix Composites. **International Journal Of Advanced Science And Technology**, v. 76, p.1-8, 31 mar. 2015. Science and Engineering Research Support Society. <http://dx.doi.org/10.14257/ijast.2015.76.01>.

SURAPPA, M. K.. Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. **Sadhana**, [s.l.], v. 28, n. 1-2, p.319-334, fev. 2003. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02717141>.

TEMPONIK. **What is Duralcan®?**. Disponível em: <<http://www.temponik.com/Duralcan®-2>>. Acesso em: 17 set. 2019.

TOTTEN, George E.; MACKENZIE, D. S. **Handbook of Aluminum**: Volume 2 Alloy Production and Materials Manufacturing. New York: Marcel Dekker, 2003.

VISWANATHA, B. M. *et al.* MECHANICAL PROPERTY EVALUATION OF A356/SiCp/Gr METAL MATRIX COMPOSITES. **Journal Of Engineering Science And Technology**, Subang Jaya, v. 8, n. 6, p.754-763, dez. 2013.

VOLZ, Eduard *et al.* Electrical and thermal conductivity of liquid phase sintered SiC. **Journal Of The European Ceramic Society**, v. 21, n. 10-11, p.2089-2093, jan. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0955-2219\(01\)00178-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0955-2219(01)00178-9).

XIN, Ling *et al.* Strengthening behavior in SiC nanowires reinforced pure Al composite. **Journal Of Alloys And Compounds**, v. 695, p.2406-2412, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.134>.