



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



VINÍCIUS DE OLIVEIRA QUINTÃO

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
UM COMPÓSITO DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMÍNIO
REFORÇADO COM RESÍDUO DE MINÉRIO DE MANGANÊS**

**OURO PRETO - MG
2022**

VINÍCIUS DE OLIVEIRA QUINTÃO
vinicius.quintão1@aluno.ufop.edu.br

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
UM COMPÓSITO DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMÍNIO
REFORÇADO COM RESÍDUO DE MINÉRIO DE MANGANÊS**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professora orientadora: Dra. Margarida Márcia Fernandes Lima

OURO PRETO – MG
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

- Q7a Quintão, Vinicius de Oliveira.
Análise estatística do comportamento mecânico de um compósito de matriz metálica de alumínio reforçado com residuo de minério de manganês. [manuscrito] / Vinicius de Oliveira Quintão. - 2022.
52 f.: il.: color., gráf., tab..
- Orientadora: Profa. Dra. Margarida Márcia Fernandes Lima.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .
1. Compostos metálicos - Alumínio - Compósitos. 2. Sinterização. 3. Metais - Reaproveitamento - Manganês. I. Lima, Margarida Márcia Fernandes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vinícius de Oliveira Quintão

Análise Estatística do Comportamento Mecânico de um Compósito de Matriz Metálica de Alumínio Reforçado com Resíduo de Minério de Manganês

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 10 de outubro de 2022

Membros da banca

[DSc] - Margarida Márcia Fernandes Lima - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)

[DSc] - Érica Linhares Reis - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[DSc] - Vinícius Carvalho Teles - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Margarida Márcia Fernandes Lima, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/10/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Margarida Marcia Fernandes Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/10/2022, às 21:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0416857** e o código CRC **A42E9FB4**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para realizar todas as conquistas e me fazer seguir em frente em todos os momentos. Aos meus familiares, em especial aos meus pais Lúcia e Valter, por sempre acreditarem nos meus sonhos e nunca medirem esforços para que eu pudesse concretizá-los. Aos meus irmãos Frederico e Mariana por todo o apoio e carinho.

A Prof^a. Dr^a Margarida Márcia Fernandes Lima, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto, pela orientação durante todas as etapas de realização deste trabalho, paciência, ensinamentos como utilizar os aparelhos do laboratório e acompanhamento dos ensaios.

À Prof^a. Dr^a Rosa Malena Fernandes Lima, do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, pelo fornecimento de materiais e equipamentos que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Rhelman Rossano Urzêdo Queiroz do Instituto Federal de Minas Gerais– Ouro Preto pela disponibilização do Laboratório de Ensaios Mecânicos para a realização dos ensaios de compressão.

A FAPEMIG, VALE e CNPq pelos equipamentos utilizados neste trabalho. A Alcoa pelo fornecimento do pó de alumínio, bem como da análise química e granulométrica deste material.

Aos meus colegas de turma em especial Uriel Mazoz e Luís Eduardo por todo o apoio durante a graduação.

Aos porteiros do prédio do Departamento de Engenharia de Minas e Escola de Minas pela recepção durante os trabalhos.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

Charles Chaplin

RESUMO

A partir da necessidade mundial de reduzir o impacto ambiental provocado pela exploração mineral, é fundamental aproveitar os resíduos provenientes da mineração que possuem pouco valor econômico. Nesse sentido, o presente trabalho busca uma forma de viabilizar a utilização de resíduos de minério de manganês como reforço para compósitos de matriz de alumínio. Foi realizada a homogeneização da mistura dos pós de alumínio e resíduos de minério de manganês, em proporção mássica de 10%, em gral de ágata durante 1h. Em seguida, foi feita a compactação do pó de alumínio puro e da mistura dos dois pós com pressão de compactação de 250MPa. As amostras verdes foram submetidas ao processo de sinterização em forno tubular sob atmosfera de argônio nas temperaturas de 590°C, 600°C e 610°C, com taxa de aquecimento de 5°C/min durante 2h. As caracterizações realizadas neste trabalho foram feitas por microscopia óptica (MO), perda de massa, densidade geométrica, ensaios de compressão e microdureza Vickers, posteriormente foi realizada uma análise estatística dos resultados. Os compósitos obtidos apresentaram microestrutura homogênea e resistência mecânica maior que do alumínio puro sinterizado nas mesmas condições de trabalho. De modo geral as amostras de compósitos se tornaram mais resistentes a compressão quando comparados com o alumínio puro. Sendo que para a temperatura de 600°C, houve um ganho de resistência mecânica de 23% em relação ao alumínio. Para todas as propriedades analisadas, os valores de variância e coeficiente de variação encontrados foram baixos, menor que 15%, apontando uma boa homogeneidade das amostras e dos dados obtidos.

Palavras-chave: aproveitamento de resíduos, sinterização, compósitos com matriz de alumínio, resíduo de minério de manganês.

ABSTRACT

Based on the global need to reduce the environmental impact caused by mineral exploration, it is essential to reuse mining waste that has little economic value. In this sense, the present work aims a way to enable the use of manganese ore residues as reinforcement for aluminum matrix composites. The mixture of aluminum powders and manganese ore residues was homogenized, in a mass proportion of 10%, in agate mortar for 1h. Then, the pure aluminum powder was compacted and the two powders were mixed with a compaction pressure of 250MPa. The green samples were submitted to the sintering process in a tube furnace under an argon atmosphere at temperatures of 590°C, 600°C and 610°C, with a heating rate of 5°C/min during 2h. The characterizations were made by the optical microscopy (OM), mass loss, geometric density and Vickers microhardness and compression tests. Finally, a statistical analysis of the results was done. The composites obtained showed a homogeneous microstructure and higher mechanical strength than pure sintered aluminum under the same working conditions. In general, the composite samples became more resistant to compression when compared to pure aluminum. For the temperature of 600°C, there was a gain in mechanical strength of 23% in relation to aluminum. For all the properties analyzed, the values of variance and coefficient of variation found were low, less than 15%, indicating a good homogeneity of the samples and the data obtained.

Key-words: waste recovery, sintering, aluminum matrix composites, manganese ore waste.

LISTA DE SÍMBOLOS

DTTM	Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral
SGM	Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PIB	Produto Interno Bruto
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
CMM	Compósitos de Matriz Metálica
CMP	Compósitos de Matriz Polimérica
CMC	Compósitos de Matriz Cerâmica
CV	Coefficiente de Variação
MO	Microscopia Óptica
\bar{x}	Média aritmética
x	Valor
n	Número de elementos
Md	Mediana
Mo	Moda
AT	Amplitude total
$X_{\text{máx}}$	Valor máximo
$X_{\text{mín}}$	Valor mínimo
Dm	Desvio médio
S^2	Variância
S	Desvio padrão
CV	Coefficiente de variação

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos vários tipos de compósitos.	4
Figura 2 - Representação do quartil.....	11
Figura 3- Fluxograma das etapas de trabalho.	17
Figura 4- Amostras verdes de alumínio puro e alumínio puro com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês.	21
Figura 5 - Forno tubular utilizado no processo de sinterização.....	21
Figura 6 - Aspecto geral da microestrutura das amostras sinterizadas a 590°C durante 2h. (a) Alumínio puro e (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Microscopia óptica.....	27
Figura 7 - Aspecto geral da microestrutura das amostras sinterizadas a 600°C durante 2h. (a) Alumínio puro e (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Microscopia óptica.....	27
Figura 8 - Aspecto geral da microestrutura das amostras sinterizadas a 610°C durante 2h. (a) Alumínio puro e (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Microscopia óptica.....	27
Figura 9 - Perda de massa por condição de trabalho.	28
Figura 10 - Média dos valores de densidade geométrica. Cor verde: amostras verdes. Cor vermelha: amostras sinterizadas. Al-V: alumínio verde. Al-Sin: alumínio sinterizado. CP-V: compósito verde. CP-Sin: compósito sinterizado. Tempo de sinterização para todas as amostras: 2h	30
Figura 11- Vista superior do aspecto geral das amostras submetidas a compressão:(a) antes (b) depois.....	31
Figura 12 - Vista lateral do aspecto geral das amostras submetidas a compressão :(a) antes (b) depois.....	32
Figura 13 - Curvas tensão versus deformação convencional. Aspecto geral do comportamento dúctil das amostras sinterizadas a 590°C durante 2h. (a) Alumínio puro (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Ensaio de compressão.	33

Figura 14 - Curvas tensão versus deformação convencional. Aspecto geral do comportamento dúctil das amostras sinterizadas a 600°C durante 2h. (a) Alumínio puro (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Ensaio de compressão.	33
Figura 15 - Curvas tensão versus deformação convencional. Aspecto geral do comportamento dúctil das amostras sinterizadas a 610°C durante 2h. (a) Alumínio puro (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Ensaio de compressão.	33
Figura 16 - Média dos valores da microdureza Vickers das amostras sinterizadas.....	34
Figura 17 - Aumento percentual de microdureza Vickers das amostras sinterizadas em relação ao alumínio puro.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fases presentes no resíduo de minério de manganês.....	18
Tabela 2 - Composição mineralógica do minério.	19
Tabela 3 - Variáveis e indicadores.....	24
Tabela 4 - Variância e coeficiente de variação das massas das amostras verdes e sinterizadas.	29
Tabela 5 - Valores de densidade geométrica com seus respectivos desvios padrões das amostras sinterizadas.	30
Tabela 6 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de microdureza Vickers das amostras sinterizadas	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Materiais compósitos	4
2.2	Compósitos de Matriz Metálica	5
2.3	Compósitos de Matriz Polimérica	6
2.4	Compósitos de Matriz Cerâmica	6
2.5	Sinterização.....	6
2.6	Estatística.....	8
2.7	Conceitos	8
2.7.1	População.....	8
2.7.2	Amostra.....	8
2.7.3	Variável.....	9
2.8	Estatística Descritiva	9
2.8.1	Medidas de posição.....	10
2.8.2	Tendência central	10
2.8.3	Média	10
2.8.4	Quartil	11
2.8.5	Mediana	11
2.8.6	Moda.....	12
2.8.7	Amplitude total	12
2.8.8	Desvio médio	13
2.8.9	Variância	13
2.8.10	Desvio padrão	14
2.9	Coeficiente de variação.....	15
3	METODOLOGIA.....	16

3.1	Tipo de Pesquisa	16
3.2	Materiais e Métodos	17
3.2.1	Materiais	18
3.2.2	Preparação das Amostras	19
3.2.3	Compactação.....	20
3.2.4	Sinterização.....	20
3.2.5	Embutimento.....	21
3.2.6	Lixamento	22
3.2.7	Polimento	22
3.2.8	Microscopia Óptica.....	23
3.2.9	Perda de massa.....	23
3.2.10	Densidade Geométrica.....	23
3.2.11	Microdureza Vickers	23
3.2.12	Ensaio de Compressão	24
3.3	Variáveis e Indicadores.....	24
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	25
3.5	Tabulação de Dados.....	25
3.6	Considerações Finais	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1	Microscopia óptica.....	26
4.2	Perda Mássica	28
4.3	Densidade geométrica.....	29
4.4	Ensaio de compressão	31
4.5	Microdureza Vickers	34
5	CONCLUSÕES.....	36
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	37

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

De acordo com os dados do Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral (DTTM) e Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM), publicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em abril de 2020, o setor mineral foi responsável por 2,47% e 2,44% do produto interno bruto (PIB) brasileiro em 2017 e 2018, respectivamente. Este cenário ocorre devido à grande demanda de matéria prima para a produção de bens de consumo.

O Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2016) salientou a importância da gestão e manejo de rejeitos de mineração que tem a sua principal problemática devido ao agravamento do extrativismo dos recursos minerais ao longo dos anos. Nesse panorama, o acúmulo de rejeitos, que na maioria das vezes são impróprios para uso, e não possuem valor comercial acarretam no armazenamento desses resíduos em barragens que por sua vez podem causar grandes impactos ambientais e sociais quando não monitorados corretamente.

Nessa problemática busca-se o aproveitamento de rejeitos de forma sustentável a fim de atenuar os danos ao meio ambiente. O manganês é considerado um elemento essencial no processo de fabricação de ligas metálicas combinado especialmente com o ferro, na produção de aço, e pode ser utilizado ainda em ligas de cobre, zinco, alumínio, estanho e chumbo.

Os materiais compósitos são uma combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes que diferem na forma e na composição química e, em sua essência, são insolúveis uns nos outros (SIJO; JAYADEVAN, 2016). De maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases, de modo que é obtida a melhor combinação de propriedades, tais como, rigidez, tenacidade e resistência mecânica, quase sempre aliadas à leveza dos produtos obtidos (CALLISTER, 2012).

Nos projetos de materiais compósitos, são combinados vários tipos de materiais, tais como, metais, cerâmicas e polímeros para produzir uma nova geração de materiais com propriedades superiores às dos materiais constituintes (ASKELAND; PHULÉ, 2008; CALLISTER, 2012). Neste contexto, ocorre a combinação de uma fase contínua, denominada de matriz, associada a uma ou mais fases dispersas, chamadas de reforço. Assim, as fases de reforço podem ser em formas de partículas, fibras, etc. As propriedades dos compósitos são

função das propriedades das fases constituintes, de suas quantidades relativas e da geometria da fase de reforço (LEVY NETO; PARDINI, 2006; CALLISTER, 2012).

De acordo com Levy Neto e Pardini (2006), as matrizes metálicas para compósitos são as mais utilizadas devido as suas peculiaridades atrativas, como resistência a corrosão, alta resistência mecânica, tenacidade à fratura, boa condutividade térmica entre outras. Nesse contexto, os autores salientam que particularmente o alumínio se destaca como um metal comumente empregado na fabricação de material compósito, devido a sua baixa massa específica e boa adesão com os agentes de reforço.

Vários trabalhos têm sido realizados em compósitos com matriz de alumínio, este trabalho tem como objetivo a utilização de ferramentas estatísticas, tais como, média, mediana, desvio padrão e análises de variância nos resultados dos valores de ensaios de microdureza Vickers e ensaios de compressão de um compósito de matriz metálica de alumínio reforçado com resíduo de minério de manganês. Tem-se então a seguinte pergunta problema:

Como as funções estatísticas podem auxiliar na discussão de dados dos ensaios mecânicos de um compósito de matriz metálica de alumínio reforçado com resíduo de minério de manganês?

1.2 Justificativa

Muitas aplicações tecnológicas exigem materiais com combinações de propriedades que não são encontradas em materiais metálicos. Ao invés de desenvolver um novo material que pode ou não ter propriedades desejadas para uma determinada aplicação, modifica-se um material já existente, através da incorporação de outro componente. Sendo assim, de acordo com Mishra (1999), para a fabricação de materiais compósitos é necessário combinar as propriedades mecânicas de dois ou mais componentes a fim obter um novo material capaz de apresentar propriedades melhoradas. Uma excepcional combinação de propriedades faz do alumínio um dos materiais mais versáteis utilizados na engenharia. A ideia básica é combinar a excelente ductilidade e conformabilidade da matriz metálica com a elevada resistência dos materiais de reforço (MISHRA *et al*, 1999).

O presente trabalho busca uma forma de aproveitar resíduo de mineração como reforço para compósitos de matriz metálica de alumínio, correlacionando as condições de trabalho utilizadas na preparação do material com as propriedades mecânicas apresentadas pelos

mesmos. Desta forma, almeja-se uma inovação tecnológica para aplicação de um novo tipo de material, diminuição do impacto ambiental pelos resíduos da mineração, proteção à saúde humana pela diminuição de finos suspensos no ar nas regiões das mineradoras e, finalmente, economia de matéria-prima.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar as propriedades mecânicas de um compósito de matriz metálica de alumínio reforçado com rejeito de minério de manganês utilizando análises estatísticas como ferramentas.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo bibliográfico sobre materiais compósitos, principalmente aqueles com matriz de alumínio e ferramentas estatísticas que avaliem as influências das condições de trabalho sobre as características dos compósitos;
- Elaborar um procedimento metodológico para obter amostras de alumínio puro e amostras de compósitos de alumínio com resíduo de minério de manganês por sinterização em atmosfera de argônio;
- Caracterizar de forma microestrutural, física e mecânica as amostras obtidas.
- Realizar análise estatística dos dados obtidos de microdureza Vickers e ensaios de compressão para comparar as amostras.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho será dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos. O segundo capítulo trata da revisão da literatura dos conceitos, estudos existentes e uso de ferramentas estatísticas na avaliação das propriedades mecânicas de materiais compósitos com matrizes de alumínio. Já o terceiro capítulo descreve os materiais e métodos utilizados para obtenção e caracterização das amostras deste trabalho. Os resultados obtidos dos ensaios de microdureza Vickers e ensaios de compressão, assim como a discussão e as análises estatísticas são apresentados no quarto capítulo. Por último, o quinto capítulo aborda as conclusões observadas de acordo com os objetivos apresentados inicialmente e também as perspectivas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais compósitos

O compósito é definido como qualquer material multifásico que possua uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constitui, obtendo-se assim uma melhor combinação das propriedades (CALLISTER, 2012). Vale ressaltar que tais características não são apresentadas por nenhum dos componentes isoladamente. Diferentes materiais podem ser combinados microscopicamente. No caso de ligas metálicas o material resultante é macroscopicamente homogêneo.

Os materiais compósitos são compostos por uma fase denominada matriz e uma fase dispersa. A fase matriz é contínua e envolve toda a fase dispersa. Em geral, a fase matriz do compósito apresenta maior tenacidade e é a fase responsável por transmitir os esforços para a fase dispersa. Já a fase dispersa é uma fase descontínua, que é responsável por absorver o esforço que é transmitido pela fase matriz, também chamado de agente estrutural (CALLISTER, 2012).

Os compósitos são definidos com relação aos tipos de matrizes que apresentam e são classificados em Compósitos de Matriz Metálica (CMM), os Compósitos de Matriz Polimérica (CMP) e os Compósitos de Matriz Cerâmica (CMC). Dentre os CMM existe uma classificação quanto ao reforço ser contínuo ou não, ou ainda quanto ao reforço ser cerâmico ou metálico (METALS HANDBOOK, 2001; CALLISTER, 2012). Na Figura 1 estão apresentados os tipos de reforços para materiais compósitos e suas subdivisões.

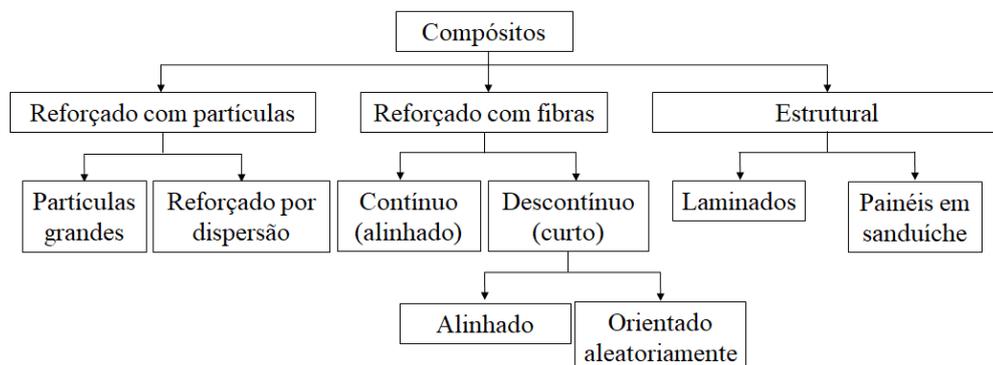


Figura 1 - Classificação dos vários tipos de compósitos.
Fonte: Adaptado de Callister (2012)

A partir das fases matriz e reforço, pode-se trabalhar com as proporções, e/ou as características de cada uma para atingirem as propriedades requisitadas, como por exemplo: maior resistência mecânica, resistência à temperatura, maior dureza, flexibilidade, entre outras.

Nas regiões que separam essas fases (as chamadas interfaces) temos propriedades diferentes das outras duas fases, abrindo assim um leque muito abrangente de possibilidades (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

2.2 Compósitos de Matriz Metálica

Os CMM geralmente consistem em uma matriz leve reforçada por partículas ou fibras curtas de um material duro. A maioria dos CMM tradicionalmente desenvolvidos são compostos de uma matriz de liga de Al e/ou Mg com fases de reforço de material cerâmico frágil, como SiC e/ou Al₂O₃ (GONZAGA *et al.*, 2020).

Pardini (2006) afirma que o alumínio é um elemento que ocupa uma posição de destaque quando o assunto é obtenção de compósitos de matriz metálica. Uma das principais características que o coloca em tal posição é a sua ductilidade e leveza, quando comparado ao aço. A adição de reforços particulados na matriz de alumínio tem uma importante relevância, uma vez que o reforço particulado influencia positivamente na estabilidade térmica e na melhora da resistência ao desgaste em relação à matriz. Diversos processos de fabricação têm sido utilizados no desenvolvimento desses compósitos, dentre eles o processo de sinterização (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Chauhan (2018) declara que existem dois métodos de processamento comumente utilizados para produzir CMM a base alumínio reforçado com partículas: técnicas de processamento por fase líquida e por fase sólida. É notável o aumento progressivo do número de aplicações de CMM. No caso dos CMM o critério de seleção para o material de reforço cerâmico inclui propriedades como: módulo de elasticidade, limite de resistência a tração, densidade, temperatura de fusão, estabilidade térmica, compatibilidade com a matriz, coeficiente de expansão térmica, tamanho e forma, e custos (PANWAR; CHAUHAN, 2018).

Devido a principal aplicação ser estrutural e assim se buscar estruturas mais leves e mais resistentes, os metais que tem sido mais utilizados como matrizes são aqueles que apresentam baixas densidades, dentre outras características, tais como ligas de alumínio, titânio, níquel, magnésio, cromo e molibdênio (MOURISCO, 1995).

2.3 Compósitos de Matriz Polimérica

Ishai (2006), explica que os reforços mais usados nos CMP são as fibras longas e curtas. O autor salienta que as mais conhecidas são: fibras de carbono, fibras de vidro, fibras de whiskers de SiC, fibras de alumina, fibras de aramida (polímero, como nylon e kevlar), fibras de boro, nitreto de silício e fibras de borosilicatos (fibra de boro revestida de SiC). Ishai (2006) destaca a existência de uma grande variedade de formas para alguns tipos desses reforços como é o caso do kevlar e das fibras de carbono. Assim pré-formas podem ser pré-fabricadas com geometrias mecanicamente adequadas para serem posteriormente utilizadas como reforços da matriz polimérica. As resinas utilizadas nos CMP são muito variadas sendo que as mais utilizadas são: epóxi, polisulfônicas, polifenilsulfônicas, poliamídicas e fenólicas (estas duas últimas para temperaturas mais altas). Os processos de fabricação destes compósitos são via extrusão da mistura resina-reforço, injeção da resina numa pré-forma ou por compressão em matriz fechada onde os reforços já estão presentes (DANIEL; ISHAI, 2006).

2.4 Compósitos de Matriz Cerâmica

Schmidt (2004) destaca o concreto como o compósito de matriz cerâmica mais comum e a sua aplicação na construção civil. O material tem como característica uma matriz de silicato reforçada por partículas (pedras) e/ou fibras metálicas (vergalhão). O autor citado ainda afirma que os compósitos de matriz cerâmica mais avançados têm suas aplicações em temperaturas mais altas em que os metais não conseguem manter a resistência mecânica. O autor expõe os principais problemas dos CMC, sendo eles a fragilidade a solicitações mecânicas e impactos a temperatura ambiente, a alta sensibilidade a choques térmicos e a baixa condutibilidade térmica. No entanto, esses compósitos quando aquecidos adequadamente, não apresentam os problemas acima citados e em muitos casos são dúcteis e plausíveis de se deformarem plasticamente (SCHMIDT *et al.*, 2004).

2.5 Sinterização

O objetivo do processo de queima é reduzir a quantidade de poros do material inicial, acompanhada por um “encolhimento” e uma ligação forte entre partículas adjacentes. Consiste no aquecimento dos materiais compactados a temperaturas elevadas, porém abaixo do ponto de fusão do principal constituinte. As variáveis envolvidas no processo de sinterização são: tempo, temperatura e atmosfera (CHIAVERINI, 1992). Os mecanismos primários envolvidos na sinterização estão ligados com os fenômenos de transporte de massa, como a difusão (no estado

sólido, principalmente) e o fluxo viscoso, que são processos termicamente ativados. Vale ressaltar que o ambiente em que ocorre a sinterização também afeta as propriedades do produto final, o que pode ser controlado através do emprego das chamadas “atmosferas protetoras” (CHIAVERINI, 1992; RICHERSON, 1992).

De acordo com Richerson (1992), a atmosfera (composição do gás) no forno pode resultar em efeitos notórios ou sutis na sinterização devido a sua interação com o material trabalhado. Os efeitos estão relacionados às condições de oxidação e redução durante o processo. As atmosferas mais utilizadas nos processos de sinterização são: hidrogênio, nitrogênio, mistura de hidrogênio-nitrogênio, CO₂, CO, argônio ou hélio e vácuo (RICHERSON, 1992).

As atmosferas de argônio e nitrogênio possuem papéis importantes na sinterização do alumínio, visto que a presença de óxidos é prejudicial, necessitando de uma atmosfera para reduzir o nível de oxigênio. Foram notados aumentos nas massas das amostras devido à formação de AlN durante o processo de sinterização. No entanto, em atmosfera de argônio, somente as amostras verdes com maior porosidade e com a presença de magnésio sofreram densificação (SCHAFFER e HALL 2002).

Liu *et al.* (2019) estudaram a influência das taxas de aquecimento de 5°C/min e 20°C/min na sinterização em atmosfera de argônio de discos de alumínio obtidos de pós com granulometrias de 15, 19 e 35µm em diferentes pressões de compactação pelo método da metalurgia do pó. O trabalho foi realizado na temperatura de 600°C durante 4h. À partir dos ensaios de dureza, o autor constatou que a menor taxa de aquecimento e o tamanho de partícula de 35µm proporcionaram um melhor processo de difusão, menor porosidade e, portanto, maior resistência mecânica. A formação de uma camada de óxido estável nas superfícies das menores partículas de alumínio dificultou o processo de sinterização. A quantidade de óxido nas superfícies dos pós pode ser reduzida pela utilização de um agente fundente, como acetamida, cloreto de zinco ou fluoreto de sódio. A adição de magnésio também interrompe a camada passivadora nas superfícies das partículas de alumínio.

Pieczonka *et al.* (2005) em seus estudos sobre a sinterabilidade do pó de alumínio foi investigada em atmosfera de argônio, nitrogênio, mistura gasosa de nitrogênio /argônio, nitrogênio/ hidrogênio e no vácuo. O autor constatou que a atmosfera de nitrogênio provoca uma melhor sinterabilidade dos pós pela mudança relevante nas propriedades do alumínio devido a formação de AlN que proporciona a contração de volume das amostras. A presença

do hidrogênio mesmo em pequenas quantidades dificulta a sinterização, uma vez que ele dificulta o processo de difusão no alumínio e impede a contração, devido ao aprisionamento do hidrogênio pelos defeitos de rede. Os resultados também apontam que o magnésio melhora a sinterabilidade do alumínio (PIECZONKA *et al.*, 2005).

Nuruzzaman, Kamaruzaman e Azmi (2016) utilizando alumina como reforço para material compósito de matriz metálica de alumínio, em proporção mássica de 5%,10% e 15%, verificaram que uma temperatura maior de sinterização, 580°C quando comparado com 550°C, acarretou no aumento da densidade das amostras e na sua microdureza, isso ocorreu devido à melhor ligação interfacial das partículas da matriz com as partículas de Al_2O_3 durante o processo.

2.6 Estatística

A Estatística é um método científico que tem por objetivo o estudo de uma população a partir de informações sobre a mesma. É um conjunto de técnicas que permite, de forma sistemática, organizar, descrever, analisar e interpretar dados oriundos de estudos ou experimentos realizados em qualquer área do conhecimento. Isto garante uma maior confiabilidade levando em consideração a quantidade de incertezas existentes no problema (RAO, 1999).

2.7 Conceitos

2.7.1 População

A população pode ser descrita como o conjunto de elementos portadores de pelo menos uma característica comum de interesse para ser estudado pela ciência Estatística. A população é finita quando seus elementos podem ser contados. A população é infinita quando não é possível contar seus elementos. Portanto, na prática, populações muito grandes para serem contadas são consideradas infinitas na estatística, embora sejam matematicamente finitas (COSTA, 2010).

2.7.2 Amostra

Guimarães (2012) aborda que uma amostra é uma parcela da população utilizada para uma posterior análise de dados. Em vez de utilizar toda a população, que resulta em maior custo, tempo e por muitas vezes ser inviável, o processo de amostragem utiliza uma pequena porção

representativa da população. A amostra fornece informações que podem ser utilizadas para estimar características de toda a população. Dessa forma o processo de amostragem deve ser realizado de forma que a amostra ou as amostras usadas sejam obtidas adequadamente. Se erros forem cometidos no momento de selecionar os elementos da amostra, o trabalho todo fica comprometido e os resultados finais serão provavelmente bastante tendenciosos (GUIMARÃES, 2012).

2.7.3 Variável

De acordo com Guimarães (2012) uma variável é uma condição ou característica das unidades da população que pode ser classificada, segundo a informação, em quantitativa ou qualitativa. Costa (2010) descreve variável quantitativa como aquela que mede quantidade, por exemplo, idade, altura, preço, quantidade de vendas, etc. Já a variável qualitativa é aquela que mede uma qualidade do indivíduo e pode ser separada em categorias, por exemplo, sexo: masculino ou feminino; nível de escolaridade: nível fundamental, médio ou superior; satisfação: baixa, média, alta e assim por diante. Dentro de cada classe dessas variáveis podemos ainda realizar mais uma separação, dividindo as variáveis quantitativas em quantitativa discreta ou quantitativa contínua (COSTA, 2010; GUIMARÃES 2012).

Akanime *et al.* (2021) descrevem a variável discreta como possíveis resultados finitos ou infinitos enumeráveis, isto é, pode-se identificar o primeiro valor, o segundo, o terceiro etc. Dessa mesma forma, os autores explicam variáveis contínuas como possíveis valores não enumeráveis, isto é, quando não é possível identificar uma ordem, pois existem infinitos valores entre os intervalos.

2.8 Estatística Descritiva

A estatística descritiva é a parte da estatística que trabalha com a organização e apresentação dos dados de uma pesquisa por meio de tabelas e gráficos. Do conjunto de procedimentos e técnicas que compõem a Estatística distinguem-se os que servem para recolher, organizar, sintetizar e descrever os dados, que formam a Estatística Descritiva, e os que, com base na Teoria das Probabilidades, permitem a análise e a interpretação dos dados, assim como efetuar inferências sobre uma população com base no estudo de uma amostra (AKANIME *et al*, 2021).

2.8.1 Medidas de posição

Mattos (2017) explica que as medidas de posição são estatísticas que orientam quanto à posição da distribuição dos dados em relação a um eixo horizontal, subdividindo-se em medidas de tendência central e medidas separatrizes ou quantis. De maneira geral, os dados tendem a ser mais numerosos em torno de um valor central (valor típico), diminuindo gradativamente sua frequência à medida que se afastam desse valor. As medidas de tendência central tentam localizar esse valor central. Assim, essas tendem a ficar no centro de um conjunto de dados. As principais são: média aritmética, moda e mediana. Já as medidas separatrizes ou quantis são aquelas que dividem o conjunto em partes que contêm determinada proporção de dados, sendo especialmente úteis quando o conjunto não é simétrico. Os quantis mais usados são: quartis, decis e percentis (centis) (MATTOS, 2017).

2.8.2 Tendência central

Segundo Akanime (2021), o valor central é um valor típico para a distribuição de probabilidade que pode ser calculado tanto para um número finito de valores quanto para uma distribuição teórica. As medidas mais comuns são a média aritmética, a mediana e a moda.

2.8.3 Média

De acordo com Moreno (2019), a média aritmética (\bar{X}) é uma das medidas mais usadas para descrever a tendência central. Que pode ser calculada a partir da razão da soma dos valores pelo número de casos como apresentado na equação (1). No entanto, apresenta uma grande desvantagem, pois sofre grandes influências de valores extremos (muito grandes ou muito pequenos) em relação aos conjuntos de dados. Dessa forma, conclui-se que a média aritmética só é um bom parâmetro de tendência central quando os dados têm distribuição simétrica.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (1)$$

Em que:

\bar{x}	Média
x	Valor
n	Número de elementos

2.8.4 Quartil

De acordo com Bussab (2010), quartil é um dos três valores (Q1, Q2 e Q3) que divide uma amostra em quatro partes iguais, e assim cada parte representa 1/4 do conjunto. O primeiro quartil, Q1 separa os dados menores ou iguais a 25% dos elementos, enquanto que o segundo quartil, Q2 é a mediana, uma vez que os valores são menores ou iguais 50%. O terceiro quartil Q3 separa os dados menores ou iguais a 75%.

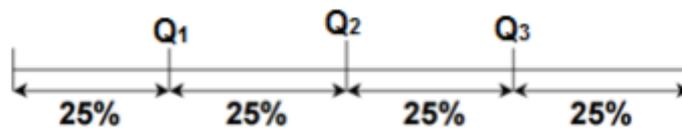


Figura 2 - Representação do quartil
Fonte: Adaptado Bussab (2010).

2.8.5 Mediana

Crespo (2009) explica que mediana é uma medida que divide o conjunto de dados ordenados ao meio, deixando a mesma quantidade de valores abaixo e acima dela, conforme apresentado na equação (2). Para realizar o cálculo da mediana, o conjunto de dados é dependente do número de elementos (n), e se esse número é par ou ímpar.

Caso o número de elementos (n) do conjunto for ímpar, a mediana será o valor do meio, conforme a equação (2).

$$Md = \frac{X_{n+1}}{2} \quad (2)$$

Caso o número de elementos (n) do conjunto for par, a mediana será o valor do meio, conforme a equação (3).

$$Md = \frac{X_{\frac{n}{2}} + X_{\frac{n}{2}+1}}{2} \quad (3)$$

Em que:

Md	Mediana
x	Valor
n	Número de elementos

2.8.6 Moda

De acordo com Mattos (2017), moda (M_o) é o valor ou atributo que ocorre com maior frequência em um conjunto de dados que pode ser subdividido em amodal e plurimodal.

- amodal, quando não apresenta moda, isto é, todas as observações da variável em estudo ocorrem com a mesma frequência;
- plurimodal ou multimodal, quando o conjunto ou distribuição apresenta mais de uma observação predominante, ou seja, mais de uma moda.

2.8.7 Amplitude total

Para Mattos (2017), Amplitude total (AT) de um conjunto de N valores X_N é, por definição, a diferença entre o maior e o menor desses valores, onde $X_{máx}$ e $X_{mín}$ representam, respectivamente, o maior e o menor valor do conjunto de observações, como descreve a equação (4).

$$AT = X_{máx} - X_{mín} \quad (4)$$

Em que:

AT Amplitude total

$X_{\text{máx}}$ Valor máximo

$X_{\text{mín}}$ Valor mínimo

2.8.8 Desvio médio

De acordo com Oliveira (2017), o desvio médio é calculado pela média aritmética dos desvios em torno da média em módulo, como pode ser visto na equação (5).

$$D_M = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}| f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (5)$$

Em que:

D_M Desvio médio

X_i Valor

\bar{x} Média

2.8.9 Variância

Segundo Silva *et al.* (2018), variância (s^2) é uma quantidade estatística que leva em consideração o erro aleatório devido a diversas fontes e fornece informação sobre o espalhamento dos dados e pode ser definida como mostra a equação (6).

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (6)$$

Em que:

S^2	Variância
n	Número de elementos
X_i	Valor
\bar{x}	Média

Anderson *et al.* (2007) sugere que a variância é dada por uma medida útil ao comparar a variabilidade entre variáveis, de modo que em uma comparação de variáveis aquela que tem a maior variância exibe maior variabilidade.

2.8.10 Desvio padrão

De acordo com Bussab (2010), o desvio padrão é definido como a raiz quadrada positiva da variância como pode-se observar na equação (7).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (7)$$

Em que:

S	Desvio padrão
X_i	Valor
\bar{x}	Média
n	Número de elementos

2.9 Coeficiente de variação

Akanime *et al.* (2021) afirmam que para comparar duas distribuições que possuem unidades de medida diferentes deve-se utilizar o coeficiente de variação (**CV**). O CV pode ser definido como a razão entre o desvio padrão e a média de distribuição, como pode ser visto na equação (8). Por ser uma medida que normaliza o desvio padrão em relação à média, e como é um quociente de duas medidas com a mesma unidade, o coeficiente de variação é adimensional, ou seja, não possui unidade.

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} * 100 \quad (8)$$

Em que:

CV Coeficiente de variação

S Desvio padrão

\bar{x} Média

Silva (2019) salienta que o coeficiente de variação é utilizado quando queremos comparar dois ou mais grupos de dados quanto a sua variabilidade em torno das médias aritméticas e quanto menor o coeficiente de variação, mais homogêneos serão os dados.

O presente capítulo discorreu de maneira geral sobre os tipos de compósitos e seus reforços, tendo ênfase em materiais compósitos de matriz metálica reforçados com partículas, processo de sinterização e seus efeitos em pesquisas de outros autores. Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre funções estatísticas para auxiliar na discussão de dados dos resultados dos ensaios mecânicos.

O próximo capítulo aborda a metodologia, materiais e métodos.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de Pesquisa

A pesquisa científica possui diversas modalidades, cada qual desenvolvida por um ou mais métodos. Entre suas modalidades, há dois tipos que são gerais e abrangem outras formas de pesquisar: a pesquisa qualitativa e a pesquisa quantitativa (MINAYO, 2007).

Segundo Knechtel (2014), a pesquisa quantitativa é uma modalidade de pesquisa que atua sobre um problema humano ou social baseada no teste de uma teoria composta por variáveis quantificadas em números, as quais são analisadas de modo estatístico, com o objetivo de determinar se as generalizações previstas na teoria se sustentam ou não. Já a pesquisa qualitativa busca entender fenômenos humanos, buscando deles obter uma visão detalhada e complexa por meio de uma análise científica do pesquisador. Esse tipo de pesquisa se preocupa com o significado dos fenômenos e processos sociais.

De acordo com Gil (2017), as pesquisas exploratórias tendem a ser mais flexíveis em seu planejamento, pois pretendem observar e compreender os mais variados aspectos relativos ao fenômeno estudado pelo pesquisador. As pesquisas exploratórias mais comuns são os levantamentos bibliográficos, porém, em algum momento, a maioria das pesquisas científicas passam por uma etapa exploratória, visto que o pesquisador busca familiarizar-se com o fenômeno que pretende estudar.

O estudo experimental segue um planejamento rigoroso. As etapas de pesquisa iniciam pela formulação exata do problema e das hipóteses, que delimitam as variáveis precisas e controladas que atuam no fenômeno estudado (TRIVIÑOS, 1987). Para Gil (2017), a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

Do ponto de vista de sua natureza, o presente trabalho enquadra-se como uma pesquisa exploratória de abordagem quantitativa, da qual utilizará procedimentos técnicos teórico-empíricos, ou seja, uma pesquisa experimental e bibliográfica.

3.2 Materiais e Métodos

Os materiais utilizados foram o pó de alumínio fornecido pela ALCOA e resíduo de minério de manganês.

Neste trabalho foram preparadas 15 amostras com a proporção mássica de 10% de resíduo de minério de manganês e 15 amostras de alumínio puro. Preparou-se 5 amostras para cada condição de sinterização nas temperaturas de 590°C, 600°C e 610°C durante 2 h. A massa de cada amostra era aproximadamente de 4g com uma altura média de 10mm e diâmetro de 15,24mm.

Para cada condição de trabalho foram obtidas cinco amostras sinterizadas. Sendo quatro amostras para o ensaio de compressão e uma amostra para microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e microdureza Vickers.

As condições de trabalho realizadas estão apresentadas no fluxograma da Figura 3.

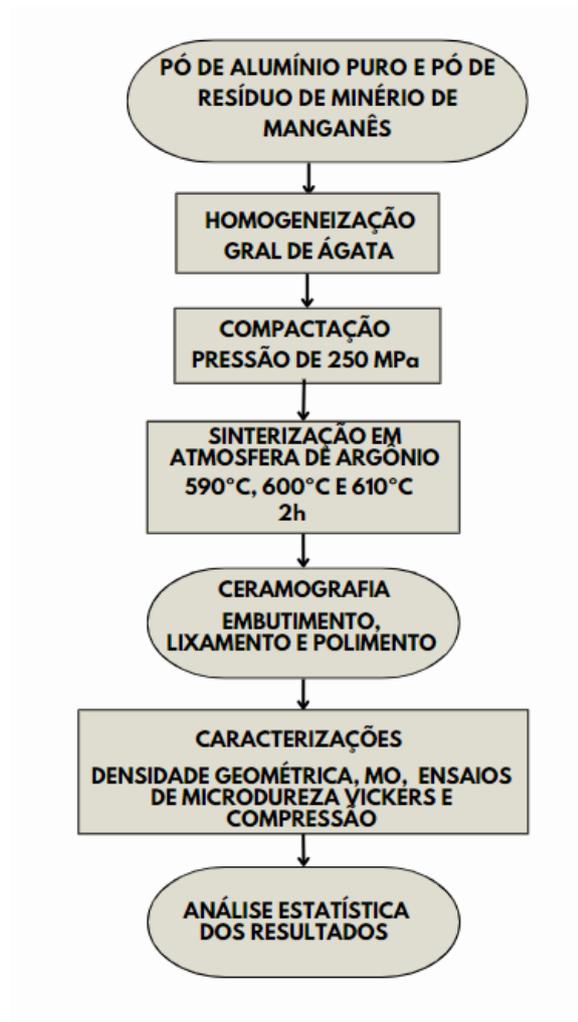


Figura 3- Fluxograma das etapas de trabalho.
Fonte: Pesquisa direta (2022).

3.2.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram pó de alumínio fornecido pela ALCOA e pó de resíduo de minério de manganês, com granulometria menor que $37\mu\text{m}$.

O resíduo de minério de manganês foi obtido na Unidade Morro da Mina que está localizada nas proximidades da cidade de Conselheiro Lafaiete MG. As fases presentes no resíduo de minério de manganês podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 - Fases presentes no resíduo de minério de manganês

Nome	Fórmula
Espessartita	$\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
Rodocrosita	MnCO_3
Quartzo	SiO_2
Clinocloro	$(\text{Mg,Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Annita	$\text{KFe}_3^{2+}\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$
Rutilo	TiO_2
Cordierita	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$

Fonte: Adaptado de Reis (2005).

Souza (2015) e Lima *et al.* (2010) caracterizaram o rejeito de minério de manganês utilizado deste trabalho. O rejeito é oriundo de um processo de beneficiamento. Segundo a Tabela 2, a composição mineralógica é majoritariamente integrada por silicatos. O principal mineral desse grupo é a espessartita que contribui com 20%. Outros grupos minerais também foram detectados, dentre eles, os carbonatos, representados pela rodocrosita, e os hidratados, como os micáceos e a monazita.

Tabela 2 - Composição mineralógica do minério.

Mineral	Fórmula química	% em peso
Espessartita (Mn-33,3%)	$Mn_3Al_2(SiO_4)_3$	20,0
Tefroita (Mn-54,5%)	$Mn_2(SiO_4)$	15,0
Carbonatos: dolomita, magnesita, huntita, e rodocrosita (Mn-47,8%)	$(Ca, Mg)CO_3$; $MgCO_3$; $CaMg_3(CO_3)_4$ e $MnCO_3$	29,0
Rodonita (Mn-41,9%)	$(Mn, Fe, Mg, Ca)_5(SiO_3)_5$	5,0
Micáceos: muscovita; biotita/flogopita	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH, F)_2$; $K(Mg, Fe)_3[AlSi_3O_{10}(OH, F)_2]$	6,0
Quartzo	SiO_2	4,0
K-Feldspato	$KAlSi_3O_8$	5,0
Opacos e outros: magnetita, rutilo, ilmenita, pirita/pirrotita, esfalerita, pentlandita, monazita e zircão	Fe_3O_4 ; TiO_2 ; $FeTiO_3$; FeS_2 ; $(Zn, Fe)S$; $(Fe, Ni)S_8$; $(Ce, La)PO_4 \cdot (H_2O)$ e $ZrSiO_4$	16,0

Fonte: Lima *et al.* (2010).

3.2.2 Preparação das Amostras

Utilizando uma balança analítica com precisão de quatro casas decimais, da marca Sartorius, modelo LA2305, mensurou-se aproximadamente 18g de pó de alumínio puro e 2g de resíduo de minério de manganês e, em seguida, utilizando um pistilo foi feita a homogeneização de 20g da mistura.

Para confecção das amostras, cuidadosamente, com uma espátula de metal, foi despejado dentro de embalagens plásticas 4g de alumínio puro, para amostras de comparação e, 4g da mistura de pó de alumínio com 10% resíduo minério de manganês.

3.2.3 Compactação

Foi utilizada uma matriz metálica específica, de aço SAE 4340, temperada e revenida para compactar as amostras em forma de cilindros. O pó contido nas embalagens plásticas foi despejado dentro da matriz com o auxílio de um funil de vidro. Essa matriz foi devidamente lubrificada com carvão ativado para facilitar a extração das amostras.

Em seguida, com o auxílio de uma prensa hidráulica, da marca Nowak, foi realizada a compactação, durante 1 min, com pressão de compactação de 250MPa. Após a compactação, foram realizadas medições geométricas e de massa das amostras. As amostras tinham dimensões de $15,24 \pm 0,01$ mm de diâmetro por aproximadamente $10,00 \pm 0,25$ mm de altura. Para cada condição de trabalho foram obtidas cinco amostras à verde.

3.2.4 Sinterização

As amostras verdes foram colocadas em barquinhas de alumina com alumina em pó em seu interior, como apresentado na Figura 4. Por condição de trabalho, foram colocadas 10 amostras, sendo 5 amostras de alumínio puro e 5 amostras da mistura de resíduo de minério de manganês com alumínio. Posteriormente, foram colocadas duas dessas barquinhas em um forno tubular, da marca Analógica, modelo 1530i, Figura 5, que foi programado com uma taxa de aquecimento de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e um patamar de 2h, em atmosfera de argônio.

Os ensaios foram feitos nas seguintes temperaturas: 590°C , 600°C e 610°C . Convencionou-se ligar o gás argônio com a vazão de $6\text{dm}^3/\text{min}$, quando o forno atingisse a temperatura de 300°C , e interromper a vazão do gás após o término do processo, quando a temperatura de resfriamento do forno chegasse a 300°C . O argônio foi empregado a fim de evitar a formação de Al_2O_3 durante o processo de sinterização das amostras. Ao todo, foram obtidas 15 amostras sinterizadas de alumínio puro e 15 amostras de alumínio com 10% de resíduo de minério de manganês.

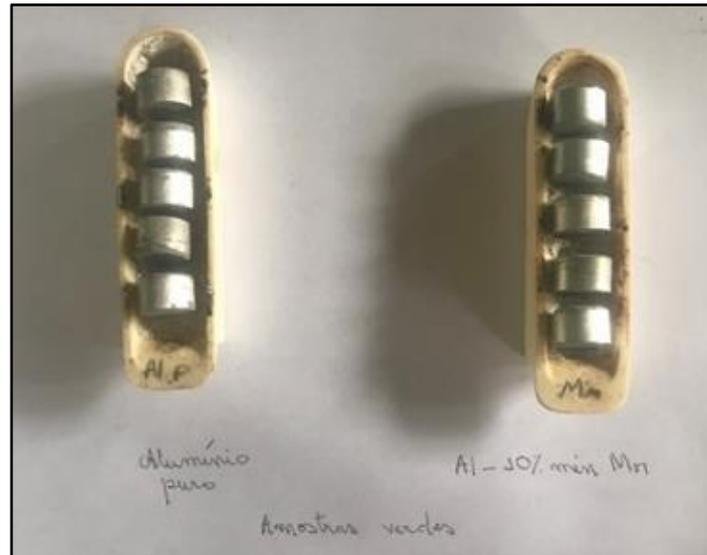


Figura 4- Amostras verdes de alumínio puro e alumínio puro com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês.
Fonte: Pesquisa direta (2022).



Figura 5 - Forno tubular utilizado no processo de sinterização
Fonte: Pesquisa direta (2022).

3.2.5 Embutimento

Devido ao tamanho das amostras, para facilitar o manuseio e realizar o lixamento e o polimento, tornou-se necessário o embutimento das amostras.

O embutimento das amostras foi realizado a frio, para cada condição de trabalho. Para tanto, foi utilizada uma resina epóxi de cura longa com seu respectivo catalisador da marca Epoxiglass, em proporção de 2:1. A mistura foi homogeneizada em um béquer de 40 mL com o auxílio de um bastão de vidro, em seguida despejou-se em moldes de borracha contendo as amostras.

Os moldes foram colocados em um dessecador durante 15min para a realização de vácuo utilizando uma bomba. As amostras foram deixadas em um tempo de cura de 24h.

3.2.6 Lixamento

Após a remoção dos moldes, foram retiradas rebarbas de resina das amostras embutidas com lixa e realizada uma marcação para identificação, com o auxílio de um marcador, da marca Drimel.

Todas as amostras foram lixadas de forma sequencial utilizando lixas de carbeto de silício de números 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200, com fluxo de água corrente sobre a lixa. O lixamento foi feito utilizando uma lixadeira/politriz metalográfica, modelo Aropol 2V, de fabricação da AROTEC.

As amostras eram giradas em torno de 90° para que as ranhuras da lixa anterior fossem totalmente removidas. Em seguida, as amostras eram lavadas com álcool e secadas com o auxílio de um secador de cabelo. Após cada lixa, as superfícies das amostras eram observadas utilizando uma lupa da marca Olympus, modelo SZ61, a fim de verificar a retirada das ranhuras da lixa anterior.

3.2.7 Polimento

Neste procedimento foi utilizado pasta de diamante com granulometrias de 6 μ m, 3 μ m, 1 μ m, 0,25 μ m. Após limpeza, o polimento das amostras foi realizado na mesma máquina de lixamento. Para tanto, foram utilizados panos de polimento específicos para cada granulometria do agente polidor.

No polimento com pasta de diamante, pequenas quantidades de pasta de diamante foram depositadas sobre o pano de polimento utilizando uma seringa com a respectiva granulometria. Em seguida, utilizando uma garrafa lavadeira foi gotejado no pano de polimento o lubrificante concentrado vermelho da marca AROTEC, próprio para materiais não-ferrosos. As amostras foram polidas e a cada passo, ocorria a limpeza com água e lavagem em ultrassom durante 5min. Posteriormente, as superfícies das amostras foram embebidas com álcool e secadas com um secador de cabelo.

3.2.8 Microscopia Óptica

Para observação das microestruturas das amostras, foi necessário nivelar as superfícies das amostras com o auxílio de massa de modelar e um planificador. Em seguida, as fotomicrografias das amostras foram realizadas utilizando um microscópio óptico da marca Olympus. Neste processo, após ajustes dos focos, utilizando uma câmera acoplada ao microscópio óptico, foi realizada a captura de imagens das microestruturas com os aumentos de 50x, 100x e 200x.

3.2.9 Perda de massa

Foram mensuradas as massas das amostras no estado verde e sinterizadas utilizando uma balança analítica, conforme citado no item 3.2.2. Os cálculos das perdas de massa foram realizados fazendo a diferença entre as massas das amostras no estado verde e sinterizadas, em relação à massa das amostras a verde.

3.2.10 Densidade Geométrica

Os valores de densidade geométrica foram obtidos fazendo-se a relação entre as massas das amostras e seus respectivos volumes. As massas foram mensuradas utilizando a balança supracitada e seus volumes foram calculados a partir dos diâmetros das bases e suas respectivas alturas.

3.2.11 Microdureza Vickers

Após a captura de imagens das microestruturas das amostras, foram realizados os ensaios de microdureza Vickers com carga de 50g utilizando um microdurômetro da marca DuraScan. A operação do equipamento envolvia o posicionamento das amostras planificadas sobre a objetiva de 10x. Em seguida, trocava-se a posição do canhão para o penetrador a fim de realizar uma indentação sobre a amostra. Após aplicação de uma pré-carga, a posição da indentação era averiguada e, então, a carga principal era aplicada. O tempo de aplicação da carga principal foi de 15s. Posteriormente, o canhão do equipamento era girado para a objetiva de 60x. Se necessário, ajustes de foco das indentações eram realizados, media-se as duas diagonais opostas e, finalmente, obtinha-se o valor de dureza daquela região escolhida. Ao todo, foram realizadas seis medições para cada amostra para análise estatística.

3.2.12 Ensaio de Compressão

Os ensaios de compressão foram realizados no laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), em uma máquina universal de ensaios da marca Time Group, modelo WDW40, com célula de carga da marca Transcell Technology Inc., modelo DBSL-SJ-10t, com capacidade de 10 toneladas. A taxa de deformação foi de $5,55 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Nestes ensaios utilizou-se 24 amostras sinterizadas, quatro para cada condição de trabalho. As amostras foram comprimidas até sua total ruptura. A partir destes ensaios, obteve-se o comportamento das amostras sob compressão.

3.3 Variáveis e Indicadores

Pode-se considerar uma variável como classificação ou medida; uma quantidade que varia; um conceito operacional, que contém ou apresenta valores; aspectos, propriedades ou fator discernível em um objeto de estudo e passível de mensuração, e os indicadores são valores acrescentados que caracterizam e quantificam essas variáveis (LAKATOS, 2003). As variáveis e os indicadores deste trabalho podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 - Variáveis e indicadores

Váriaveis	Indicadores
Amostras de alumínio	Perda mássica Densidade geométrica Temperatura de sinterização
Amostras de compósito	Tipo de reforço Perda mássica Densidade geométrica Temperatura de sinterização
Sinterização	Atmosfera de argônio Temperatura Tempo
Caracterização	Microscopia óptica Densidade geométrica Microdureza Vickers Ensaio de compressão Análise estatística dos dados

Fonte: Pesquisa direta (2022).

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Os dados deste trabalho foram obtidos por meio dos seguintes instrumentos:

- Balança analítica de precisão.
- Coleta de dados referente a microdureza Vickers pelo microdurômetro.
- Coleta de dados e parâmetros referentes ao ensaio de compressão.

3.5 Tabulação de Dados

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, os cálculos referentes à análise estatística foram realizados no *software Microsoft Excel®*, devido às ferramentas contidas nesse programa que simplificam os cálculos dos parâmetros a serem analisados. Após a realização dos cálculos foi utilizado novamente o *software Microsoft Excel®* para gerar gráficos e facilitar o entendimento dos resultados obtidos.

3.6 Considerações Finais

Este capítulo abordou os procedimentos técnicos necessários para obtenção e caracterização das amostras. Foram relacionadas também as ferramentas e equipamentos utilizados. Por fim, foram apresentadas as variáveis e seus indicadores, a forma de coleta e manipulação dos dados.

No próximo capítulo são apresentados os resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Microscopia óptica

Nas Figuras 6 à 8 estão apresentadas as imagens das microestruturas das amostras obtidas por microscopia óptica para cada condição de trabalho. As figuras 6 (a), 7 (a) e 8 (a) são de alumínio puro. Enquanto as figuras 6 (b), 7 (b) e 8 (b) são dos compósitos com matriz de alumínio reforçado com 10% de resíduo de minério de manganês sinterizados nas temperaturas de 590°C, 600°C e 610°C durante 2h, respectivamente. As amostras de alumínio puro apresentaram-se mais densas, haja vista a pequena presença de pontos pretos na superfície das amostras enquanto comparadas com o compósito. Acredita-se que devido a uma má homogeneização da resina de embutimento a frio, a microestrutura das amostras 6 (a) e 7 (a) não ficaram nítidas. Houve arraste de resina formando uma película sobre as superfícies das amostras. Assim, na preparação ceramográfica das amostras, a resina mascarou a imagem das microestruturas. Foi constatado a partir das análises de microscopia óptica que todas as amostras apresentaram uma boa dispersão dos reforços do resíduo de minério de manganês e que as partículas apresentaram tamanhos variados, como pode-se observar nas Figuras 6 (b) 7 (b) e 8 (b).

Nos experimentos realizados por Nuruzzaman, Kamaruzaman e Azmi (2016) quando foi utilizado alumina como reforço para compósito com matriz de alumínio, os autores relatam que o aumento da temperatura de sinterização favorece uma melhor ligação interfacial das partículas da matriz de alumínio com as partículas de Al_2O_3 durante a sinterização resultando em amostras com maior densidade. Em termos de microestrutura, este fato não pôde ser constatado neste trabalho.

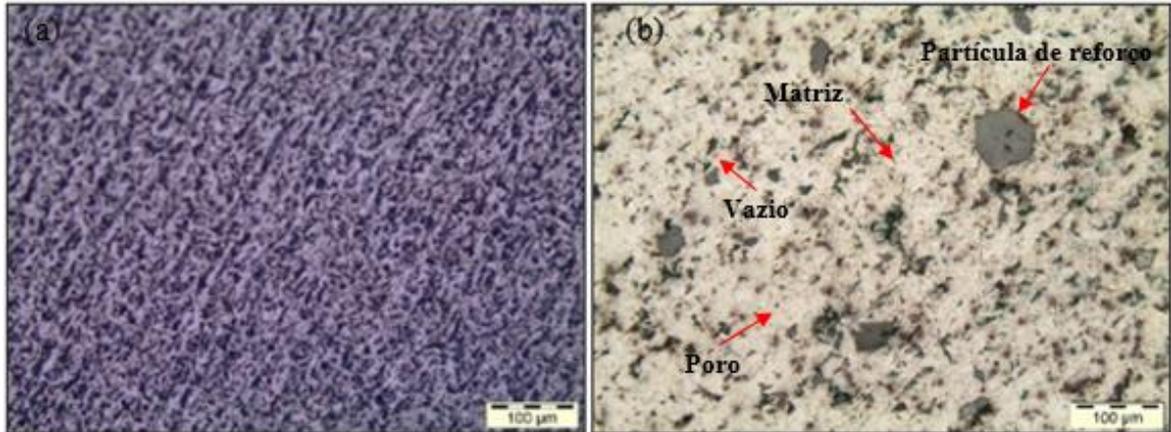


Figura 6 - Aspecto geral da microestrutura das amostras sinterizadas a 590°C durante 2h. (a) Alumínio puro e (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Microscopia óptica
Fonte: Pesquisa direta.

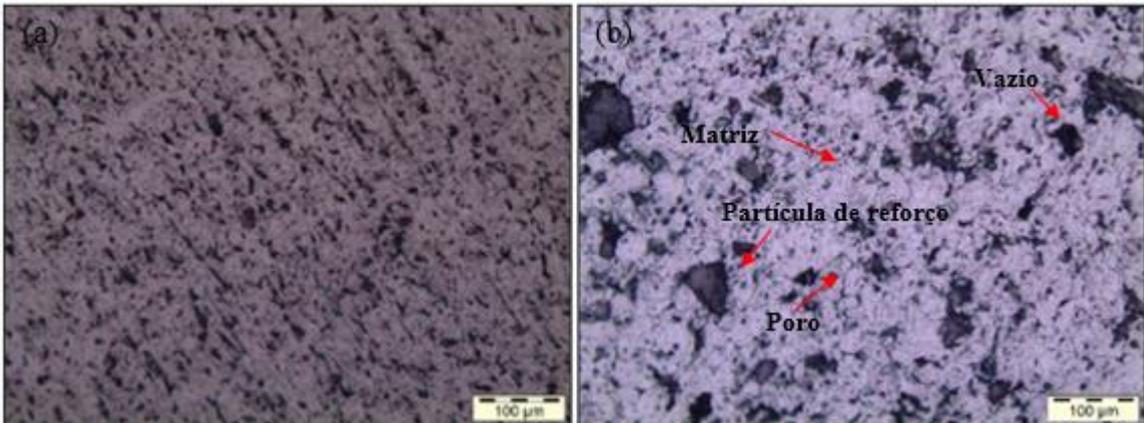


Figura 7 - Aspecto geral da microestrutura das amostras sinterizadas a 600°C durante 2h. (a) Alumínio puro e (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Microscopia óptica.
Fonte: Pesquisa direta.

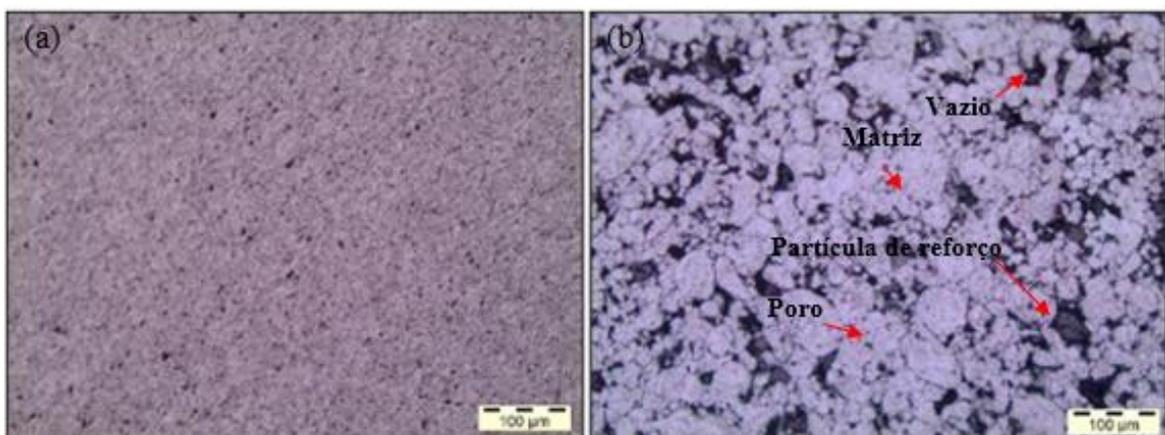


Figura 8 - Aspecto geral da microestrutura das amostras sinterizadas a 610°C durante 2h. (a) Alumínio puro e (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Microscopia óptica.
Fonte: Pesquisa direta.

4.2 Perda Mássica

As perdas de massa das amostras sinterizadas podem ser observadas na Figura 9. Nota-se que houve uma menor redução mássica para a temperatura de 600°C. Acredita-se que a redução da massa no processo de queima aconteça devido a volatilização de materiais contidos no resíduo e a oxidação do carvão ativado utilizado na lubrificação da matriz de compactação. Vale destacar a precisão da balança utilizada neste trabalho, quatro casas decimais. As amostras apresentaram um baixo erro percentual indicando que os comportamentos das mesmas se assemelham.

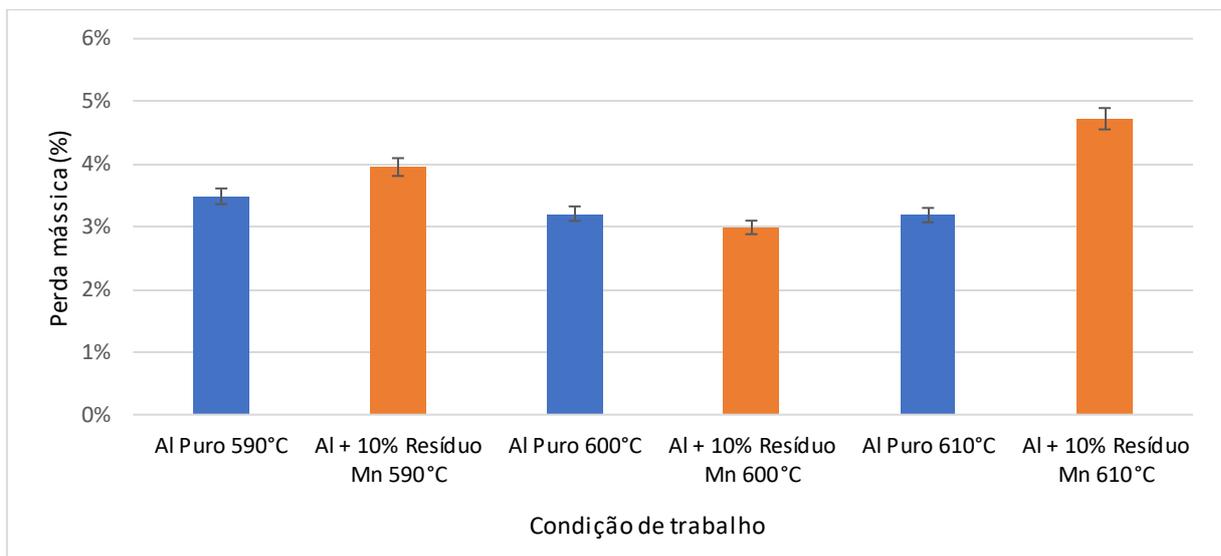


Figura 9 - Perda de massa por condição de trabalho.

Fonte: Pesquisa direta (2022).

Os valores de variância e o coeficiente de variação das massas das amostras verdes e sinterizadas estão apresentados na Tabela 4. Sabe-se que os valores de variância mostram a distância dos valores em relação à média. Os valores encontrados foram baixos para todas as condições de trabalho indicando que as amostras possuem uma massa padronizada. Como o coeficiente de variação fornece a dispersão dos valores em relação à média e um baixo coeficiente (valores $\leq 15\%$) apontam para uma boa homogeneidade dos dados, conforme apresentado na Tabela 4.

Vale ressaltar que essa pequena variação da massa nas amostras sinterizadas ocorreu devido a utilização de atmosfera de argônio durante o processo de sinterização impedindo a formação de óxidos de alumínio (Al_2O_3). No trabalho de Nuruzzaman (2016) e Pieczonka (2005) que utilizaram atmosfera de nitrogênio, houve formação de alumina e nitrato de alumínio. Essas fases são mais densas quando comparadas com o alumínio puro.

Tabela 4 - Variância e coeficiente de variação das massas das amostras verdes e sinterizadas.

Condição de trabalho	Temperatura de sinterização (°C)	Variância	Coeficiente de variação/ amostra verde	Coeficiente de variação/ amostra sinterizada
Al Puro	590	0.0002	0.318%	0.438%
Al + 10% Resíduo	590	0.0050	1.559%	1.994%
Al Puro	600	0.0003	0.358%	0.449%
Al + 10% Resíduo	600	0.0017	0.912%	0.870%
Al Puro	610	0.0105	2.277%	1.904%
Al + 10% Resíduo	610	0.0020	0.989%	1.152%

Fonte: Pesquisa direta 2022.

4.3 Densidade geométrica

Os valores de densidade geométrica das amostras verdes e sinterizadas estão apresentados na Figura 10. De maneira em geral, o desvio padrão observado foi baixo e as amostras sinterizadas apresentaram uma menor densidade em relação as amostras verdes.

Em geral, os valores de densidade mostraram-se próximos, tanto das amostras verdes como das sinterizada para todas as condições de trabalho. No entanto, as amostras de alumínio puro apresentaram-se ligeiramente mais densas. Constata-se também uma pequena diminuição de densidade das amostras sinterizadas em relação às amostras verdes. Presume-se que tenha havido uma pequena formação de alumina, mesmo sendo a densidade do alumínio puro de $2,7\text{g/cm}^3$ e da alumina de $3,95\text{g/cm}^3$. O que deve ser levado em consideração é a má aderência do óxido formado com a matriz que contribuiram para a diminuição dos valores de densidade. Corroborando com o que foi dito anteriormente, as amostras apresentaram um desvio percentual médio de 7,50% por condição de trabalho.



Figura 10 - Média dos valores de densidade geométrica. Cor verde: amostras verdes. Cor vermelha: amostras sinterizadas. Al-V: alumínio verde. Al-Sin: alumínio sinterizado. CP-V: compósito verde. CP-Sin: compósito sinterizado. Tempo de sinterização para todas as amostras: 2h
Fonte: Pesquisa direta 2022.

Só para enfatizar o que foi dito anteriormente, os valores das médias das densidades geométricas com os respectivos desvios padrões das amostras sinterizadas estão apresentadas na Tabela 5. Conforme supracitado, as amostras de alumínio sinterizadas apresentaram-se ligeiramente mais densas que os compósitos. Este fato pode estar relacionado com a má aderência das partículas de reforço com a matriz e pequenas formações de alumina.

Tabela 5 - Valores de densidade geométrica com seus respectivos desvios padrões das amostras sinterizadas.

Condição de trabalho	Temperatura de sinterização (°C)	Densidade (g/cm³)
Al Puro	590	2.0865±0.0109
Alumínio + 10% Resíduo	590	2.0544±0.0131
Al Puro	600	2.0810±0.0263
Alumínio + 10% Resíduo	600	2.0972±0.0047
Al Puro	610	2.1363±0.0376
Alumínio + 10% Resíduo	610	2.0820±0.0190

Fonte: Pesquisa direta (2022).

4.4 Ensaio de compressão

As Figuras 11 e 12 apresentam o aspecto das amostras antes e depois do ensaio de compressão. É notado que as amostras apresentaram o mesmo comportamento ao serem comprimidas, ou seja, todas formaram um disco. Essa característica é apresentada por materiais dúcteis, como o alumínio o qual foi utilizado como matriz das amostras.

Foi observado também que as amostras apresentaram fraturas nas bordas indicando uma maior fragilidade nessa região. Sabe-se que uma vez que um material é comprimido ele é submetido a esforços trativos em suas laterais. Vale ressaltar que as amostras com o reforço de resíduo de minério de manganês possuíam as bordas mais quebradiças quando comparadas com as amostras de alumínio puro por causa da pior aderência do reforço com a matriz.

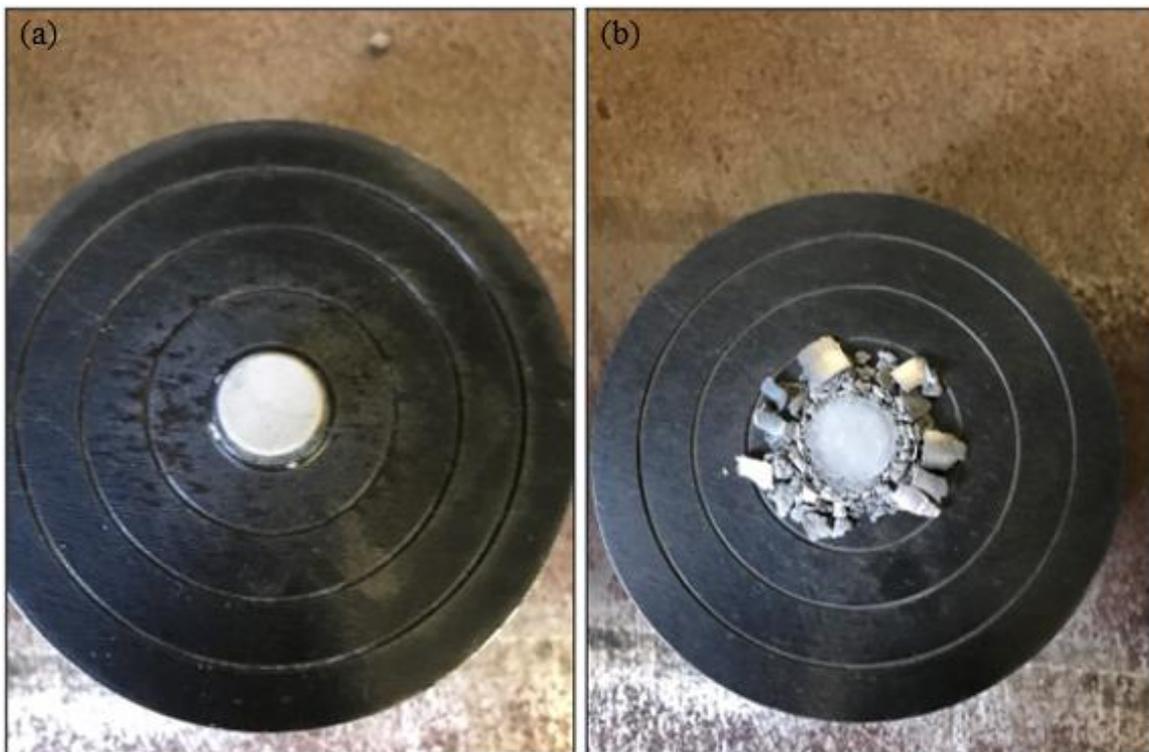


Figura 11- Vista superior do aspecto geral das amostras submetidas a compressão:(a) antes (b) depois.
Fonte: Pesquisa direta (2022).

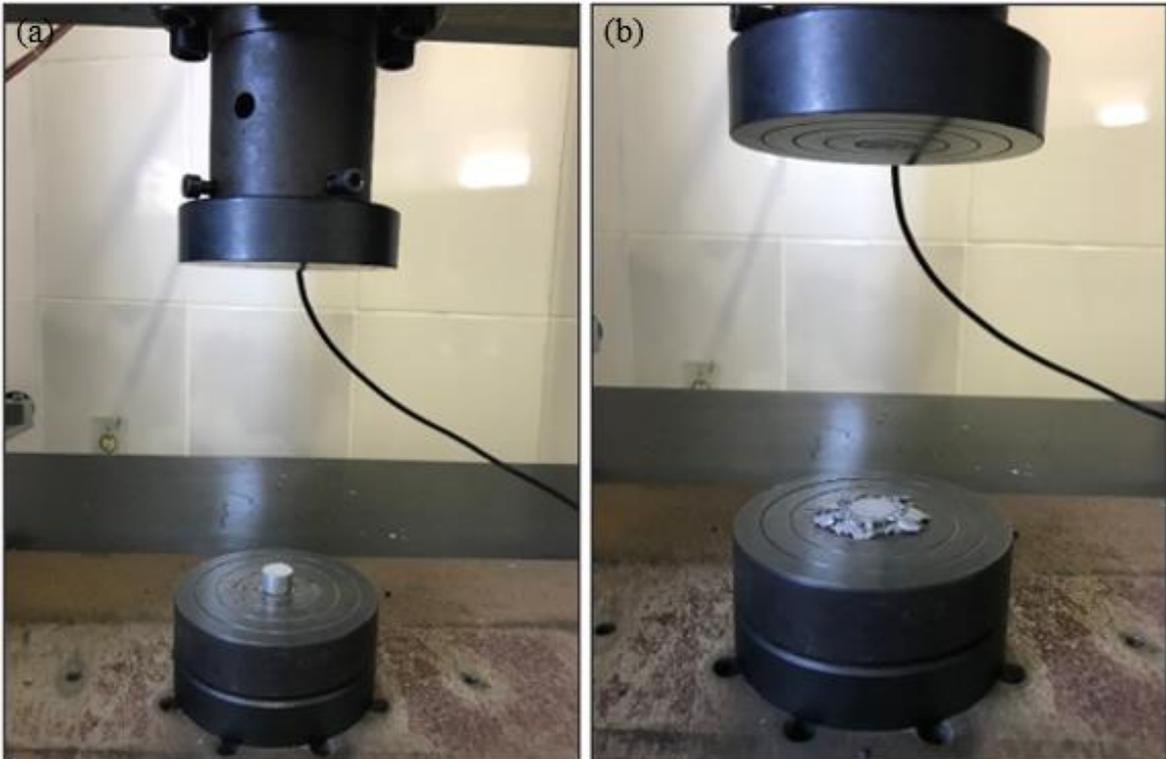


Figura 12 - Vista lateral do aspecto geral das amostras submetidas a compressão : (a) antes (b) depois.
Fonte: Pesquisa direta (2022).

De maneira geral, os compósitos apresentaram maior resistência a compressão quando comparados ao alumínio puro, como pode ser observado nas Figuras 13 a 15. Observa-se que existe um comportamento dúctil por parte desses materiais, essa propriedade está diretamente relacionada ao alumínio empregado na matriz.

A análise das curvas tensão x deformação foram avaliadas até o valor de 30% de deformação. Observa-se que para as amostras de alumínio puro é encontrado um valor de resistência aproximado para todas as condições de sinterização. No entanto, para as amostras com reforço de resíduo de minério de manganês, observa-se um aumento da resistência de acordo com o aumento da temperatura de sinterização, denotando uma melhor aderência das partículas de reforço com a matriz. De modo geral, pode-se afirmar que as partículas de resíduo de minério de manganês favoreceram o aumento de resistência mecânica. No entanto, o maior aumento de resistência mecânica se deu devido à interação das linhas de discordâncias durante os ensaios de compressão por encruamento.

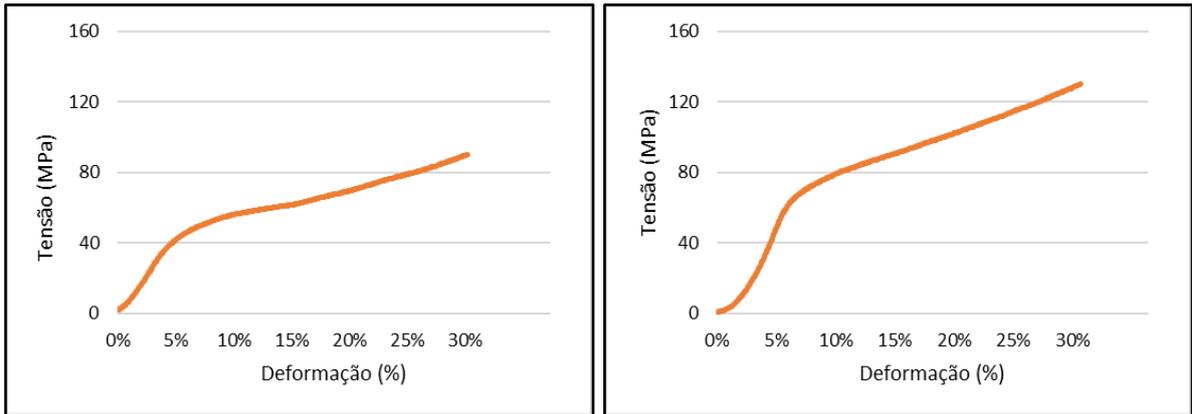


Figura 13 - Curvas tensão versus deformação convencional. Aspecto geral do comportamento dúctil das amostras sinterizadas a 590°C durante 2h. (a) Alumínio puro (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Ensaio de compressão.
 Fonte: Pesquisa direta.

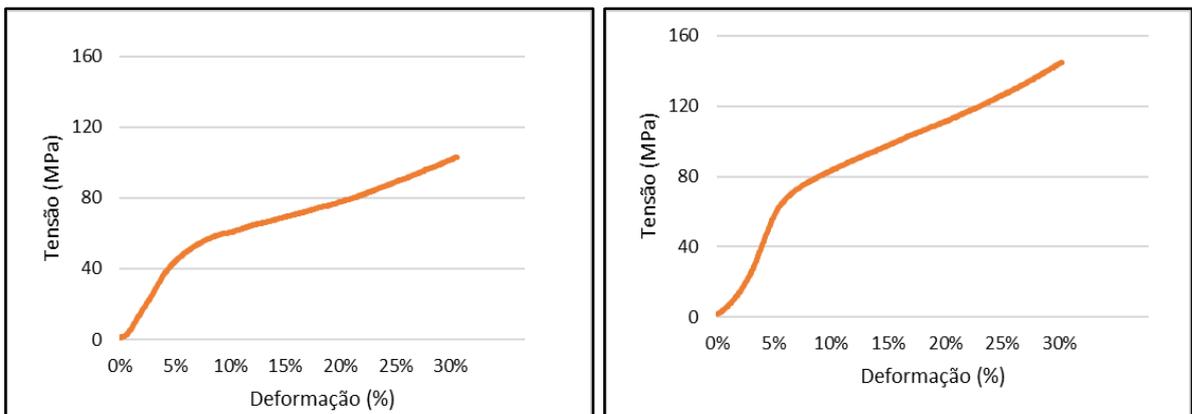


Figura 14 - Curvas tensão versus deformação convencional. Aspecto geral do comportamento dúctil das amostras sinterizadas a 600°C durante 2h. (a) Alumínio puro (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Ensaio de compressão.
 Fonte: Pesquisa direta (2022).

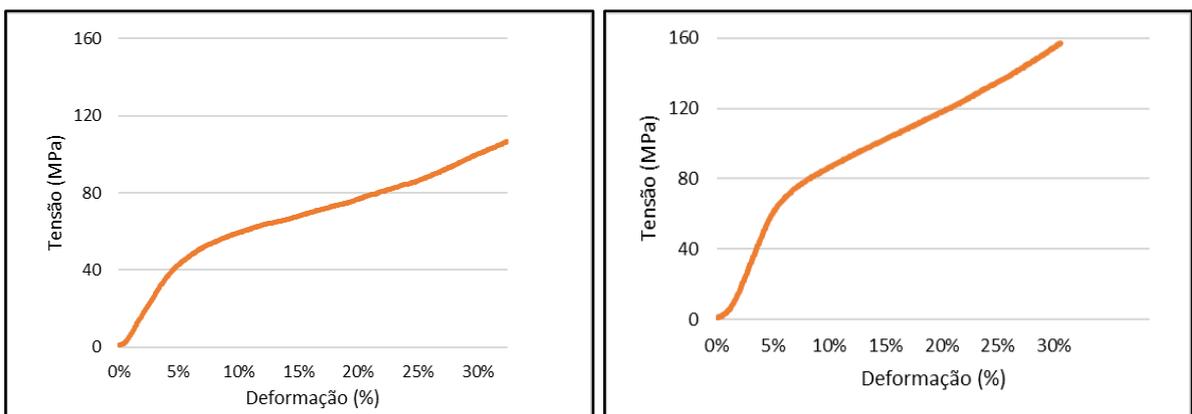


Figura 15 - Curvas tensão versus deformação convencional. Aspecto geral do comportamento dúctil das amostras sinterizadas a 610°C durante 2h. (a) Alumínio puro (b) Alumínio com 10% de reforço de resíduo de minério de manganês. Ensaio de compressão.
 Fonte: Pesquisa direta (2022).

4.5 Microdureza Vickers

Os valores da média, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados de microdureza Vickers estão apresentados na Tabela 6. Nota-se que as amostras sinterizadas com o reforço de resíduo de manganês apresentaram uma microdureza maior quando comparadas com as amostras de alumínio puro, como é mostrado também na Figura 16. Como as partículas do reforço têm maior resistência que o alumínio puro, os valores de dureza dos compósitos foram mais elevados que o alumínio puro. O coeficiente de variação menor que 15% garante uma boa confiabilidade dos dados devido à baixa dispersão.

Tabela 6 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de microdureza Vickers das amostras sinterizadas

Condição de trabalho	Temperatura de sinterização (°C)	Média de microdureza Vickers (HV)	Coeficiente de variação
Al Puro	590	48.73 ±3.79	7.78%
Al +10% Res.	590	50.25 ±3.20	6.37%
Al Puro	600	44.13 ±4.08	9.25%
Al +10% Res.	600	54.18 ±6.98	12.89%
Al Puro	610	43.42 ±5.49	12.64%
Al +10% Res.	610	48.07 ±4.80	9.98%

Fonte: Pesquisa direta (2022).

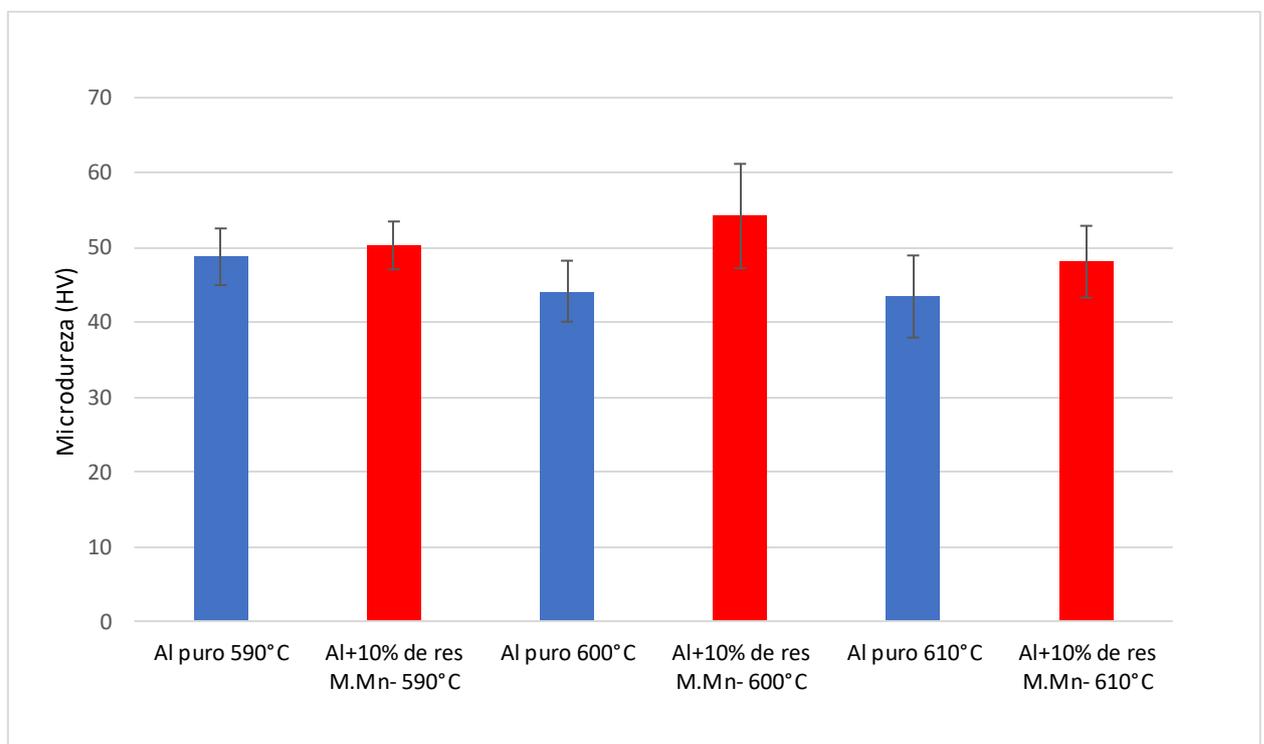


Figura 16 - Média dos valores da microdureza Vickers das amostras sinterizadas.

Fonte: Pesquisa direta (2022).

Vale destacar que durante o ensaio de microdureza são realizadas indentações aleatórias ao longo das superfícies das amostras. Dessa forma, pode-se afirmar que algumas medições foram realizadas próximas e/ou sobre o reforço atribuindo uma maior resistência mecânica aos compósitos. Para a temperatura de sinterização a 600°C constatou-se um aumento de dureza de 23%, em comparação ao alumínio puro.

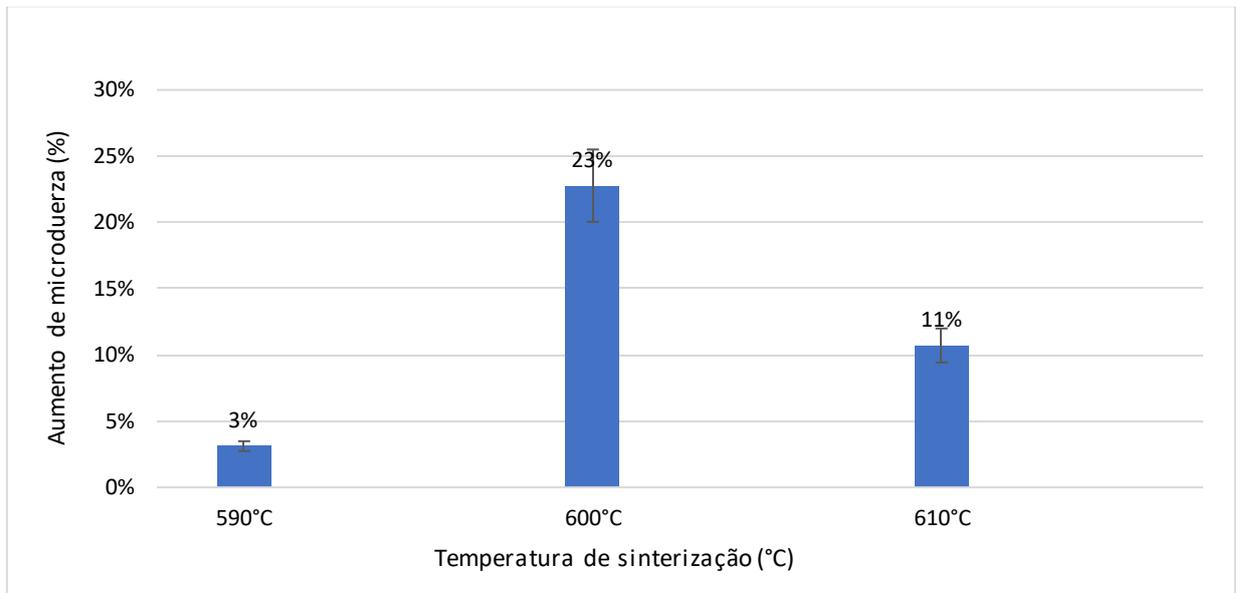


Figura 17 - Aumento percentual de microdureza Vickers das amostras sinterizadas em relação ao alumínio puro. Fonte: Pesquisa direta (2022).

5 CONCLUSÕES

Para as condições de trabalho realizadas, conclui-se que:

Os compósitos apresentaram uma boa dispersão dos reforços do resíduo de minério de manganês na matriz de alumínio, maior resistência mecânica e menor densidade que o alumínio puro.

Para a temperatura de 600°C, as amostras apresentaram maiores valores de dureza, maior densidade e menor perda de massa. Constatou-se um aumento de dureza de 23% em comparação ao alumínio puro.

Acredita-se que devido à atmosfera de argônio, houve uma pequena formação de alumina nos produtos sinterizados.

Constatou-se uma pequena diminuição dos valores de densidade geométrica das amostras sinterizadas em relação às amostras verdes. Supõe-se que seja devido às más aderências da alumina formada e dos reforços com a matriz de alumínio, evaporação de fases voláteis do reforço e pequena oxidação do carvão ativado usado na lubrificação da matriz de compactação. Os valores de densidade geométrica apresentaram-se próximos com um desvio percentual médio de 7,50% por condição de trabalho.

Os compósitos apresentaram características de materiais dúcteis devido ao alumínio empregado na matriz.

Observou-se um aumento da resistência mecânica com a elevação de temperatura para os compósitos. Para o alumínio, não houve alteração.

Para todas as propriedades analisadas, os valores de variância e coeficiente de variação encontrados foram baixos, menor que 15%, apontando uma boa homogeneidade das amostras e dos dados obtidos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.

AKANIME, Carlos. T.; YAMAMOTO, Roberto. K. **Estudo Dirigido de Estatística Descritiva**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2013.

ANDERSON, D. R.; SWEENEY, D. J.; WILLIAMS, T. A. **Estatística Aplicada à Administração e Economia**. 2. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

ASM Metals Handbook. Composites. Volume 21, 2001.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 594 p.

AWASTHI, A.; PANWAR, N.; SINGH WADHWA, A.; CHAUHAN, A. **Mechanical Characterization of Hybrid Aluminium Composite—A Review**. Mater. Today Proc. 2018, 5, 27840–27844. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.021>.

BUSSAB, Wilton de O. e MORETTIN, Pedro A. – **Estatística Básica**, 6 ed., São Paulo: Saraiva, 2010.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. 8 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do pó: Técnica e produtos**. 3. ed. São Paulo: ABM, 1992. 352 p.

COSTA, GIOVANI GLAUCIO DE OLIVEIRA. **Estatística Aplicada ao Turismo**. v. 1 . – 2.ed. – Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2010. 192 p

CRESPO, Antônio A. **Estatística fácil**. 17. ed. São Paulo: Saraiva, 2009.

DANIEL, I. M., ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Material**. New York: Oxford University Press, 2006.

GIL, Carlos, A. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa, 6ª edição**. São Paulo, Atlas, 2017.

GONZAGA, MARIA ALINE MARTINS, PASSOS, TIBÉRIO ANDRADE DOS E GOMES, RODINEI MEDEIROS. **Caracterização de compósitos de alumínio reforçado com partículas quasicristalinas produzidos por stir casting/laminação**. *Matéria* (Rio de Janeiro) [online]. 2020, v. 25, n. 2 [Acessado 5 Dezembro 2021], e-12631. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1031>>.

GUIMARÃES, PAULO RICARDO BITTENCOURT. **Métodos quantitativos estatísticos** / Paulo Ricardo Bittencourt Guimarães. - 1.ed. rev..- Curitiba, PR : IESDE Brasil, 2012. 252p.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Organizador: Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. Brasília: IBRAM, 2016.

KNECHTEL, Maria do Rosário. **Metodologia da pesquisa em educação: uma abordagem teórico-prática dialogada**. Curitiba: Intersaberes, 2014.

LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas 2003.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. 416 p.

LIU, J., SILVEIRA, J., GROARKE, R. *ET AL*. **Effect of powder metallurgy synthesis parameters for pure aluminium on resultant mechanical properties**. *Int J MaterForm* **12**, 79–87 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1408-5>.

LIMA, R.M.F.; PEREIRA. E.E.; REIS, E.L.; SILVA, G.R. **Caracterização e concentração de rejeito de minério de manganês**. Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2010.

MATTOS, Viviane. Leite DE. D.; DE, AZAMBUJA, Ana. Maria. V.; CRISTINA, KONRATH, A. **Introdução à Estatística - Aplicações em Ciências Exatas**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MOURISCO, Aroldo José. **Preparação e caracterização de compósito de matriz de alumínio 1100 com partículas de sic por metalurgia do pó**. 1995. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Nuclear, Ipen, São Paulo, 1995.

MORENO, Luisa & Morcillo, André. (2019). **Estatística Descritiva**. 10.13140/RG.2.2.15977.44649.

MISHRA, R. S., et al.. **Severe Plastic Deformation Processing and High Strain Rate Superplasticity in na Aluminum Matrix Composite**. ScriptaMaterialia,v. 40, n 10, 1151–55, 1999.

MINAYO, M. C. de S. **O desafio do conhecimento**. 10. ed. São Paulo: HUCITEC, 2007.

NURUZZAMAN, DEWAN MUHAMMAD; KAMARUZAMAN, FARAH FAZIRA BINTI; AZMI, NASRAH BINTI MOHD. Effect of Sintering Temperature on the Properties of Aluminium Oxide Composite Materials. **International Journal of Engineering Materials and Manufacture (2016) 1(2) 59-64**, [s. l.], 20 dez. 2016.

OLIVEIRA, De.Francisco.Estevam. M. **Estatística e Probabilidade - Exercícios Resolvidos e Propostos, 3ª edição**. Rio de Janeiro Grupo GEN LTC, 2017.

PIECZONKA, T. e SCHUBERT, THOMAS e BAUNACK, STEFAN e KIEBACK, BERND. (2005). **Sintering Behaviour of Aluminium in Different Atmospheres**.

RAO, C.R. **Statistics: A technology for the millennium Internal**. J. Math. &Statist.Sci, Vol. 8, No.1, Junho 1999.

REIS, Érica Linhares. **Caracterização de resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico-carbonatado da RDM – Unidade Morro da Mina**. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

RICHERSON, D. W. **Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing and Use and Design**. Second Edition. 1992.

SCHAFFER, G.B.; HALL, B.J. The Influence of the Atmosphere on the Sintering of Aluminum. **METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A**, [s. l.], Out 2002.

SCHMIDT, S., BEYER, S., KNABE, H., *et al*, "**Advanced ceramic matrix composite materials for current and future propulsion technology applications**", *Acta Astronautica*, v. 55, n. 3-9, pp. 409-420, 2004

SIJO, M. T.; JAYADEVAN K. R., “**Analysis of stir cast aluminiumsilicone carbide metal matrix composite: A comprehensive review**”, *Procedia Technology*, Vol. 24, pp 379-385, 2016.

SILVA, Ermes Medeiros; SILVA, Elio Medeiros; GONÇALVES, Valter; MUROLO, Afrânio C. **Estatística, 5ª edição**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2018.

Sistema de Contas Nacionais – Brasil 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. (Notas Técnicas). Disponível em: <<https://bit.ly/3gEAqQ4>>.

SOUZA, L.G.P.; **Aplicação de resíduos de minério de manganês na forma de uma peça obtida pela metalurgia do pó**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Orientador: Margarida Márcia Fernandes Lima.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987.