

OBTENÇÃO VIA METALURGIA DO PÓ E CARACTERIZAÇÃO DA  
DUREZA DO COMPÓSITO DE LIGA DE ALUMÍNIO AA 6061  
REFORÇADO COM DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO  
FORNO A CARVÃO VEGETAL.

**PAULO XIMENES ARAGÃO FILHO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE  
DE MATERIAIS DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Brasília, junho de 2016.

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE UnB GAMA-FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE  
MATERIAIS DA ENGENHARIA**

**PAULO XIMENES ARAGÃO FILHO**

**OBTENÇÃO VIA METALURGIA DO PÓ E CARACTERIZAÇÃO  
DA DUREZA DO COMPÓSITO DE LIGA DE ALUMÍNIO AA6061  
REFORÇADO COM DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE  
ALTO FORNO A CARVÃO VEGETAL**

**ORIENTADOR: DR. EMMANUEL PACHECO ROCHA LIMA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS  
DA ENGENHARIA**

**PUBLICAÇÃO: FGA.DM – 035A /2016**

BRASÍLIA/DF: JULHO/2016  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE UnB GAMA/FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE  
MATERIAIS DA ENGENHARIA

PAULO XIMENES ARAGÃO FILHO

OBTENÇÃO VIA METALURGIA DO PÓ E CARACTERIZAÇÃO  
DA DUREZA DO COMPÓSITO DE LIGA DE ALUMÍNIO AA6061  
REFORÇADO COM DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE  
ALTO FORNO A CARVÃO VEGETAL

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia da  
Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como  
parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de  
Mestre.

APROVADA POR:



Prof. Dr. Emmanuel Pacheco Rocha Lima  
(Orientador)



Prof. Dr. Daniel Monteiro Rosa  
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Rodrigo Arbey Muñoz Meneses  
(Examinador Externo)

Brasília, 16/06/2016

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

ARAGÃO FILHO, PAULO XIMENES

OBTENÇÃO VIA METALURGIA DO PÓ E CARACTERIZAÇÃO DA DUREZA DO COMPÓSITO DE LIGA DE ALUMÍNIO AA6061 REFORÇADO COM DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO A CARVÃO VEGETAL, [Distrito Federal] 2016. 88 pg. 210 x 297 mm (FGA/FT/UnB, Mestre, Integridade de Materiais da Engenharia, 2016). Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama. Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia.

1. LIGA DE ALUMINIO    2. ESCORIA DE AUTO FORNO

3.COMPOSITO DE MATRIZ METALIGA 4. PARTICULADO DE ESCORIA

I. FGA/FT/UnB II. Título FGA.DM - 035A/2016

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

ARAGÃO FILHO, P.X. (2016). OBTENÇÃO VIA METALURGIA DO PÓ E CARACTERIZAÇÃO DA DUREZA DO COMPÓSITO DE LIGA DE ALUMÍNIO AA6061 REFORÇADO COM DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO A CARVÃO VEGETAL. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia, Publicação Nº FGA.DM-035/2016, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF.

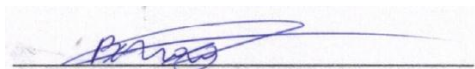
## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: PAULO XIMENES ARAGÃO FILHO.

TÍTULO: OBTENÇÃO VIA METALURGIA DO PÓ E CARACTERIZAÇÃO DA DUREZA DO COMPÓSITO DE LIGA DE ALUMÍNIO AA6061 REFORÇADO COM DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO A CARVÃO VEGETAL.

GRAU: Mestre ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



PAULO XIMENES ARAGÃO FILHO

Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte

CEP 70190-900 Brasília, DF – Brasil. paxiafilho@gmail.com

**AGRADECIMENTOS**

À Deus, em primeiro lugar, pela graça de acordar todos os dias.

Ao meu orientador, Professor Dr. Emmanuel Pacheco Rocha Lima, pelo apoio e orientação na execução deste trabalho acadêmico.

Aos meus professores e mestres.

A minha esposa Erika e filhas Maria Eduarda e Maria Clara, pela compreensão e incentivo nos momentos de dificuldade e cansaço.

Ao IFBA- Salvador, e, em especial, aos Professores Mestre Pedro Cunha, Nélio Scrivener e Rômulo Trindade pela tão valiosa ajuda com a preparação dos corpos de prova.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e a todos os seus professores, funcionários e laboratoristas.

Aos meus colegas de Mestrado, e a todos que, mesmo não sendo nominalmente citados, me auxiliaram de certa forma em algum passo dessa jornada.

Muito obrigado a todos!

## **RESUMO**

O atual cenário industrial, principalmente dos setores aeroespacial, aeronáutico e de transportes de um modo em geral, vem exigindo materiais mais leves e resistentes, assim como, mais estáveis térmica e quimicamente, exigências estas que não são atendidas com a aplicação isolada de ligas metálicas, materiais poliméricos ou cerâmicos. Tal exigência de combinação de propriedades direciona para a utilização de materiais compósitos. No que diz respeito, em especial, aos compósitos reforçados por partículas, sabe-se que a distribuição homogênea do reforço na fase matriz é condição essencial e indispensável para se alcançar a melhoria das propriedades mecânicas, condição esta que é atingida de maneira mais eficiente através de técnicas de metalurgia do pó (MP) e sinterização. Diante disso, o presente trabalho tem como foco principal o estudo do desenvolvimento e fabricação de compósitos de matriz metálica da liga de Alumínio AA6061 reforçada com diferentes teores de escória particulada de alto forno a carvão vegetal através da técnica de metalurgia do pó, com a finalidade de aprimorar as propriedades mecânicas do material da matriz. Inicialmente foram realizadas as caracterizações química e morfológica dos pós da liga de alumínio e da escória isoladamente. Em seguida, amostras do compósito foram preparadas nos teores de 5, 10, 15, 20, 25 e 30% (em peso). Após a mistura dos constituintes, amostras dos materiais foram compactadas uniaxialmente com pressão de compactação de 500 MPa em molde metálico e submetidas a sinterização com 550 °C e tempo de permanência de 240min em atmosfera inerte. Depois de consolidadas, foi realizada a preparação metalográfica para posterior medição da dureza e análise em microscopia eletrônica de varredura. Medidas da densidade antes e após a sinterização foram realizadas pelo método geométrico. Apesar da dureza ser considerada uma propriedade pontual e apresentar algumas limitações com relação aos seus processos de medição, foi possível verificar através dos resultados obtidos um incremento desta propriedade com o acréscimo de escória de alto forno para teores de até 20%, sem, no entanto, provocar alterações significativas na densidade do compósito em relação ao material da matriz obtida pelo processo de metalurgia do pó. Para os teores de escória 25 e 30%, houve uma queda nos valores da dureza acompanhada de uma redução na densidade do compósito, indicando que para estes teores a sinterização da liga de alumínio pode ter sido prejudicada. No entanto, de um modo geral, foi possível verificar a presença de uma certa quantidade de poros no material, o que pode justificar os valores relativamente baixos de densidade e dureza encontrados, quando comparados com a densidade da liga de alumínio AA 6061 obtida por fusão. Tais resultados indicam que houve algum problema na sinterização que pode ter sido causado por ineficiência do processo de compactação, baixa temperatura de sinterização ou

oxidação prévia das partículas da liga de alumínio devido ao acondicionamento da mesma. A distribuição de partículas de escória verificada através de microscopia indicou que o processo de mistura dos pós se mostrou eficiente, apresentando uma distribuição relativamente uniforme. Finalmente, podemos concluir que é possível obter o compósito de liga de alumínio AA 6061 reforçado com partículas de escória de alto forno a carvão vegetal pelo processo de metalurgia do pó, conferindo uma aplicação estrutural na indústria metal-mecânica a um subproduto da aciaria.

**Palavras-chaves:** Compósitos de matriz metálica de liga de alumínio, Reforço Particulado, Metalurgia do Pó, Moagem de Alta energia, Escória de Alto Forno.

**ABSTRACT**

The current industrial scenario, especially the aerospace, aeronautical and transportation, in a way generally has demanded lighter and resistant materials, as well as with more thermal and chemical stability which are not met with the isolated application of metal alloys, polymer or ceramic materials. This requirement directs combination of properties for use in composite materials. With regard, in particular to composites reinforced by particles, it is known that a homogeneous distribution of the reinforcement in the matrix phase is essential and indispensable condition for achieving improved mechanical properties, a condition that is attained more efficiently by powder metallurgy techniques (MP) and sintering. Therefore, this paper focuses primarily on the study of the development and manufacture of metal matrix composite AA6061 aluminum alloy reinforced with different particulate slag content of blast furnace charcoal by powder metallurgy technique, in order to improve the mechanical properties of the matrix material. Initially were carried out chemical and morphological characterization of powders of aluminum alloy and slag singly. Then, composite samples were prepared at concentrations of 5, 10, 15, 20, 25 and 30% (by weight). After mixing of the constituents of the material, the samples were uniaxially compacted with a compaction pressure of 500 MPa in a metallic mold and subjected to sintering to 550 ° C and 240min residence time in an inert atmosphere. Once consolidated, the metallographic preparation for subsequent hardness measurement and analysis in scanning electron microscopy was performed. Density measurements before and after sintering were performed by the geometric method. Despite the hardness be considered a punctual property and have some limitations with respect to their measurement processes, it was verified by the results of an increase of this property with addition the blast furnace slag to levels of up to 20%, without, however, causing significant changes in the composite density relative to the matrix material obtained by powder metallurgy process. For the slag content 25 and 30%, there was a decrease in the values of hardness accompanied by a reduction in the density of the composite, indicating that, at these levels sintering of the aluminum alloy it may have been impaired. However, generally, it was possible to verify the presence of a certain amount of pores in the material, which may justify the relatively low values of density and hardness found when compared with the density of the AA 6061 aluminum alloy obtained by melting. These results indicate that there was some problem in sintering which may have been caused by inefficiency of the compaction process, low sintering temperature or prior oxidation of aluminum alloy particles due to packaging thereof. The distribution of slag particles checked by microscopy indicated that the blend of powders was efficient process, having a relatively uniform distribution.



Finally, we can conclude that it is possible to obtain the aluminum alloy AA 6061 composite reinforced with blast furnace slag particles charcoal by powder metallurgy process, giving a structural application in the metal industry a byproduct of steelmaking.

**Key-words:** Aluminium alloys metal matrix composites, Particulate reinforcement, Powder Metallurgy, Mechanical alloying, High energy ball milling, Blast-furnace slag charcoal.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Fatores que influenciam nas propriedades dos compósitos .....	21
Figura 2.2 - Efeito da quantidade de reforço sobre o módulo de elasticidade do alumínio (adaptado).....	24
Figura 2.3 - Mapa de desempenho de vários materiais de engenharia, em termos de temperatura de operação (° C) e relação resistência/peso (adaptado) .....	25
Figura 2.4 – Descrição esquemática dos três tipos de compósitos de matriz metálica classificados de acordo o reforço .....	25
Figura 2.5 – Arranjo dos compósitos reforçados com fibra .....	26
Figura 2.6 – Classificação de materiais compósitos segundo o reforço .....	28
Figura 2.7 - Fluxograma simplificado da fabricação de peças por Metalurgia do Pó .....	37
Figura 2.8 – Diagrama comparativo dos processos metalúrgicos convencionais com a metalurgia do pó .....	38
Figura 2.9 - Representação Esquemática de atomizador de pós-metálicos .....	40
Figura 2.10- Vista de uma cuba de um moinho atritor .....	41
Figura 2.11 - Diferentes graus de homogeneização da mistura de pós .....	43
Figura 2.12 – Ciclo de Compactação.....	44
Figura 2.13 - Transformação de uma determinada quantidade de pó para sua correspondente quantidade densificada .....	47
Figura 3.1 – Fluxograma de fabricação e caracterização do compósito elaborado .....	49
Figura 3.2 – Balança de precisão (UNIBLOC, modelo AUY220) .....	51
Figura 3.3 – Moinho atritor horizontal .....	52
Figura 3.4 – Molde e Prensa hidráulica (Hidrumon, modelo PH200) .....	53
Figura 3.5 – Forno tubular .....	54
Figura 3.6 – Ciclo de Sinterização AA6061+ reforço de escória de carvão vegetal .....	54
Figura 3.7 – Lixas e Politriz .....	55
Figura 3.8 – Espectrômetro por energia dispersiva de raio-X, Oxford Instruments ADD0007.....	56

Figura 3.9 – Microscópio Eletrônico de Varredura .....	57
Figura 3.10 – Durômetro Mitutoyo .....	59
Figura 4.1 – Difratoograma de raios X da escória de Alto Forno a carvão vegetal resfriada em água (Cortesia Empresa Gusa Nordeste).....	62
Figura 4.2 – Gráfico da distribuição dos tamanhos de partícula para o pó da liga de alumínio AA 6061 determinada por peneiramento sequencial.....	63
Figura 4.3 – Gráfico da distribuição dos tamanhos de partícula para o pó da escória de alto forno a carvão vegetal determinada por peneiramento sequencial.....	63
Figura 4.4 - Gráfico de Dureza Rockwell H realizada do compósito da liga de alumínio AA6061 reforçada com escória de carvão vegetal e percentual do aumento de densidade das amostras.....	69
Figura 4.5 – Imagens de MEV dos pós conforme recebidos (a) da liga alumínio AA6061 e (b) da escória de alto forno a carvão vegetal.....	70
Figura 4.6 – Imagens de MEV e resultados de EDS da liga alumínio AA6061 sinterizada.....	71
Figura 4.7 – Imagens de MEV do compósito sinterizado de liga alumínio AA6061 reforçado com partículas de escória de alto forno a carvão vegetal nas concentrações de (a) 5% e (b) 10%.....	72
Figura 4.8 – Imagens de MEV e resultado de EDS do compósito sinterizado de liga alumínio AA6061 reforçado com partículas de escória de alto forno a carvão vegetal na concentração de (a) 15%.....	72
Figura 4.9 – Imagens de MEV e resultado de EDS do compósito sinterizado de liga alumínio AA6061 reforçado com partículas de escória de alto forno a carvão vegetal na concentração de (a) 20%.....	73
Figura 4.10 – Imagens de MEV do compósito sinterizado de liga alumínio AA6061 reforçado com partículas de escória de alto forno a carvão vegetal nas concentrações de (a) 25% e (b) 30%.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparativos de propriedades dos metais e compósitos .....	21
Tabela 2.2 – Propriedades físicas e mecânicas do aço e das ligas de alumínio .....	33
Tabela 3.1 – Distribuição de peso por amostra .....	52
Tabela 3.2 - Escala de dureza Rockwell normal e aplicações .....	58
Tabela 4.1 – Composição química da liga de alumínio AA6061 .....	60
Tabela 4.2 – Composição química do pó de alumínio .....	61
Tabela 4.3 – Composição química da escória .....	61
Tabela 4.4 – Densidade e medidas geométricas das amostras sinterizadas .....	64
Tabela 4.5 – Dureza Rockwell H para amostra de liga de alumínio AA6061 sinterizada .....	65
Tabela 4.6 – Dureza Rockwell H amostra com 5% de escória de carvão vegetal .....	65
Tabela 4.7 – Dureza Rockwell H para amostra com 10% de escória de carvão vegetal .....	66
Tabela 4.8 – Dureza Rockwell H para amostra com 15% de escória de carvão vegetal .....	66
Tabela 4.9 – Dureza Rockwell H para amostra com 20% de escória de carvão vegetal .....	66
Tabela 4.10 – Dureza Rockwell H para amostra com 25% de escória de carvão vegetal .....	67
Tabela 4.11 – Dureza Rockwell H para amostra com 30% de escória de carvão vegetal .....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>CP</i>	Corpos de prova
<i>DL</i>	Difração a laser
<i>DRX</i>	Difração de raios-X
<i>DSC</i>	Calorimetria diferencial de varredura
<i>EDS</i>	Espectroscopia de energia dispersiva de raios
<i>EMF</i>	Efeito memória de forma
<i>MAE</i>	Moagem de alta energia
<i>MEV</i>	Microscopia eletrônica de varredura
<i>SMA</i>	<i>Shape Memory Alloys</i> - ligas com memória de forma
<i>SME</i>	Efeito de memória de forma
<i>SiC</i>	Silicatos de Carbono
<i>ALMACO</i>	Associação Latino Americana de Compósitos

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcentagem
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
$A_f$	Temperatura final da austenita
$Al$	Alumínio
$A_s$	Temperatura inicial da austenita
$Be$	Berílio
$Cu$	Cobre
$EA$	Módulo de elasticidade da fase austenita
$EM$	Módulo de elasticidade da fase martensita
$K$	Grau Kelvin
$Md$	Temperatura acima da fase martensita
$M_f$	Temperatura final de transformação da martensita
$M_s$	Temperatura de início de transformação da martensita
$Ni$	Níquel
$T$	Tempo
$T$	Temperatura
$TT$	Temperatura de transformação
$\varepsilon_e$	Deformação elástica
$\varepsilon_{reor}$	Deformação reversível
$\sigma/\varepsilon$	Módulo de elasticidade
$\sigma$	Tensão

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	JUSTIFICATIVA .....	18
1.2	OBJETIVO .....	19
1.2.1	Objetivo Geral .....	19
1.2.2	Objetivos Específico.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS .....	20
2.1.1	Classificação dos compósitos e aspectos metalúrgicos .....	20
2.1.2	Compósitos de matriz cerâmica.....	22
2.1.3	Compósitos de matriz polimérica.....	22
2.1.4	Compósitos de matriz metálica .....	23
2.1.5	Emprego na indústria.....	28
2.1.6	Economia e impacto ambiental.....	31
2.2	ALUMÍNIO .....	32
2.3	ESCÓRIA .....	34
2.4	METALURGIA DO PÓ .....	36
2.4.1	Características dos materiais sinterizados .....	38
2.4.2	Pós Metálicos.....	40
2.4.3	Mistura.....	42
2.4.4	Compactação .....	43
2.4.5	Sinterização .....	45
2.5	METALURGIA DO PÓ DO ALUMINIO E SUAS LIGAS.....	47
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	48
3.1	MATERIAIS.....	50
3.2	MÉTODOS .....	50

3.2.1	Peneiramento dos pós .....	50
3.2.2	Pesagem dos constituintes .....	51
3.2.3	Procedimento de mistura .....	52
3.2.4	Procedimento de compactação .....	53
3.2.5	Sinterização do Compactado Verde .....	53
3.3	CARACTERIZAÇÃO .....	55
3.3.1	Medição da densidade das amostras antes e após a sinterização.....	55
3.3.2	Procedimento metalográfico tradicional.....	55
3.3.3	Caracterização por Fluorescência de Raios-X.....	56
3.3.4	Microscopia .....	57
3.3.5	Dureza Rockwell H .....	57
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	60
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMO RECEBIDOS .....	60
4.2	DENSIDADES DOS COMPÓSITOS .....	64
4.3	DUREZ DOS COMPÓSITOS DE ALUMÍNIO REFORÇADOS COM CARVÃO VEGETAL.....	65
4.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) .....	70
5	CONCLUSÕES .....	75
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	76
7	REFERÊNCIAS .....	77
8	ANEXO .....	84
8.1	ANEXO I - DENSIDADE E MEDIDAS GEOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS COM (5,10, 15, 20, 25, 30%) DE ESCÓRIA.....	84





# 1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes questões da indústria atual, reside na influência de curto e longo prazo, das atividades fabris sobre o meio ambiente e ecossistemas, bem como a prática de ações sustentáveis que contribuam com um mundo agradável.

Boa parte das necessidades do cenário tecnológico atual vem exigindo materiais com um compilado de propriedades que outrora não são encontrados em materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos. Visto isso, ao invés de se criar novos materiais, Callister (2008) garante que a saída é investir na modificação de materiais já existentes, por meio da inclusão de outros componentes, culminando então na fabricação dos materiais ditos compósitos, que agregam características mecânicas de dois ou mais elementos, com a finalidade de obter um novo composto com propriedades melhoradas e que apresentem menor impacto ambiental e/ou maiores esforços de reciclagem.

Resultado da combinação de materiais com diferentes propriedades físico-químicas e mecânica associado ao uso de distintos processos de manufatura, os compósitos são largamente utilizados, com mais de 40 mil aplicações catalogadas em inúmeros segmentos e atividades de cunho metalúrgico, conforme os dados da Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (ALMACO).

A matriz e o reforço são os elementos que integram um material compósito. Segundo afirma Potter (1997), a matriz tem função de preencher as lacunas existentes entre os reforços, de modo que esses sejam mantidos em suas posições relativas, e recebam os esforços mecânicos, fornecendo ductilidade, mesmo que pequena, ao compósito. Os reforços avivam as propriedades mecânicas, químicas e/ou eletromagnéticas do compósito como um todo, e geralmente possuem elevada rigidez e resistência, uma vez que suportam os esforços. Potter (1997) assegura ainda que, a resistência do compósito atingirá seus níveis máximos quando as partículas possuírem a orientação do esforço, e será mínima quando estiverem orientadas na direção perpendicular.

Convém mencionar ainda, conforme CHOI, J.; KONG, Y.; Kim, H.; AM, J. (1998), a boa aderência da matriz à fibra é proveniente da semelhança no coeficiente de expansão térmica do reforço e da matriz, ou seja, quanto mais parecido, melhor a adesão.

O papel da formulação de compósitos que utilizam alumínio (elemento abundante e altamente reaproveitável) como matriz, e escória de alto-forno como reforço, associada a técnicas de fabricação menos poluentes, como é o caso da metalurgia do pó, revelam caminhos promissores no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável, visto que a reciclagem e o baixo gasto energético estão presentes no processo.

Como destaca o Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, as vantagens apresentadas pelo processo de metalurgia do pó, se confrontado com demais técnicas metalúrgicas (como a fundição), serão: o baixo custo da produção, que equilibra o custo elevado do pó, se comparado ao custo das barras e chapas metálicas; a viabilidade de produzir ligas e materiais fora do equilíbrio, que não são fabricadas por meio de métodos convencionais como a fusão, seguida de lingotamento e conformação a quente; a simplicidade do processo de produção, que possibilita a preparação de novos componentes com melhores características com uma menor taxa de desperdício; o baixo impacto ambiental por não ser poluente e por exigir uma baixa energia de transformação do material.

Face às vantagens apresentadas, o processo de Metalurgia do pó, por meio da moagem de alta energia e compactação uniaxial, seguida de sinterização, promete efeitos satisfatórios na produção da matriz metálica de alumínio AA6061, reforçado com escoria de alto forno a carvão vegetal.

GHADIRI, M.; FARHADPOUR, F.A.; CLIFT R.; SEVILLE, J.P.K (1991) afirmam que a metalurgia do pó é comumente realizada na ausência, ou presença somente parcial de fase líquida, acarretando em economia de energia e concomitantemente redução de custos por peça fabricada. Segundo Stadtler (1989), o processo de fabricação via metalurgia do pó possibilita o desenvolvimento de peças metálicas pequenas com design complexo, geralmente componentes de automóveis, equipamentos médicos e outros. A respeito das etapas da metalurgia do pó, Lenel (1972) enuncia que o processo tem início com um pó metálico muito fino, que é depositado em um molde e depois prensado (compactado) até assumir a forma definitiva, denominada de compactado verde, que em seguida é submetido a sinterização.

No Brasil, conforme alega a Metallum (empresa de Eventos Científicos), a metalurgia do pó vive uma fase de consolidação, de modo que os materiais sinterizados são aproveitados basicamente por dois ramos industriais, a automotiva (70%) e a de utilidades domésticas (26%). Atualmente os veículos brasileiros levam 5kg de sinterizado dentre os seus

componentes, metade do valor registrado na Europa, e demasiado distante dos 20kg utilizados nos automóveis norte-americanos.

A Hoganas, líder mundial em produção de pó de ferro, relatou em um de seus estudos sobre o potencial de crescimento de tecnologias da metalurgia do pó no mercado brasileiro, que seria possível incluir mais 5kg de sinterizados nos veículos.

Visto esse cenário de crescimento, desenvolver pesquisas que culminam em materiais que fazem o uso dessa tecnologia é extremamente benéfico, principalmente quando o foco está na formulação de compostos que aproveitam integralmente escórias industriais, fomentando o desenvolvimento de uma indústria moderna menos poluente, mais econômica e dinâmica.

A pesquisa desenvolvida no presente trabalho contou com a preparação de compósitos de matriz metálica da liga de alumínio AA6061, com a incorporação de reforços particulados de escória de alto forno a carvão vegetal nas frações mássicas de 5, 10,15, 20, 25 e 30% em peso de cada reforço por meio de uma tecnologia de moagem de alta energia (MAE) através de um moinho do tipo SPEX, acompanhado da compactação uniaxial a frio e sinterização. As caracterizações química e morfológica dos materiais foram realizadas por Fluorescência de raios-X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) aliada e Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios - X (EDS). A caracterização mecânica foi realizada por medidas de dureza Rockwell H.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A relevância do tema está associada à crescente demanda por materiais compósitos que apresentem características não encontradas em materiais cerâmicos, poliméricos e metálicos incitando a formação de recursos humanos cada vez mais especializados e capacitados para atender e sustentar os desafios na evolução da indústria moderna, além da questão da utilização de resíduos de outros processos como matéria-prima que diminuem os impactos ambientais.

Nesse contexto, a concepção de uma liga de alumínio com reforço de escória a carvão vegetal se compõe como um importante passo na evolução da indústria de materiais que alia a necessidade de aprimorar as características do alumínio, vastamente empregado na indústria

de materiais, com um resíduo que possui boas propriedades mecânicas e ainda pouco utilizado na indústria.

## **1.2 OBJETIVO**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O trabalho tem como objetivo principal apresentar um compósito formado a partir da liga de alumínio AA6061 e escória de alto-forno, matriz e reforço respectivamente, bem como as técnicas de sinterização, usando moagem de alta energia e compactação uniaxial, mostrando a maneira como tais procedimentos ocorreram e a consequente caracterização da liga criada por meio de ensaios das amostras utilizadas e avaliar por meio da análise das propriedades mecânicas a possibilidade de utilização deste material na indústria.

### **1.2.2 Objetivos Específico**

- Analisar a viabilidade técnica da metalurgia do pó como procedimento de fabricação dos compósitos da liga de alumínio AA6061 reforçado com escória de alto forno a carvão vegetal.
- Examinar a melhoria a dureza da liga de alumínio AA6061 reforçada com diferentes frações mássicas de escória a carvão vegetal.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Compósitos são rotulados como os materiais advindos da combinação de dois ou mais materiais, que podem ou não possuir separação interfacial. O objetivo dessa combinação heterogênea é gerar um novo componente com propriedades (mecânicas dentre outras) diferentes das dos seus constituintes, ou otimizadas, de modo que apresente melhor desempenho estrutural em condições de uso específicas (FILHO, 2009).

Segundo VENTURA (2009), a produção de compósitos na indústria provém da combinação de duas fases (matriz e reforço), com a finalidade de formar um novo material que comumente apresenta melhor desempenho que seus constituintes em situações particulares, culminando assim em uma nova geração de materiais com melhores propriedades mecânicas. Nota-se que, as técnicas desenvolvidas no fabrico de materiais compósitos visam substituir ligas metálicas, cerâmicas e poliméricas, de modo que essas venham atender com mais eficiência às novas exigências tecnológicas do mercado.

Na natureza, podemos perceber que todos os materiais biológicos são compósitos, sem exceção. Exemplos encontrados de compósitos naturais incluem madeira, em que a matriz de lignina é reforçada com fibras celulósicas, e ossos, em que a matriz composta por minerais é reforçada com fibras colágenas. Desde a Antiguidade encontramos exemplos de compósitos feitos pelo homem, como adobes reforçados com palha para evitar a quebra da argila, e o uso de colmos de bambu no reforço de adobe e lama em paredes no Peru e China. (HIDALGO-LÓPES, 2003, p.163).

#### 2.1.1 Classificação dos compósitos e aspectos metalúrgicos

Chawla (1987) define compósitos como materiais formados de no mínimo dois compostos fisicamente e/ou quimicamente distintos configurados de forma conveniente. Em sua maioria, os materiais compósitos são sintetizados a partir de dois elementos: material base, chamado matriz, e um reforço ou carga, disperso no primeiro. A matriz é tida como a fase contínua, enquanto o reforço, fase dispersa. A finalidade da matriz é transferir a tensão e

resguardar o reforço do ambiente externo, mantendo-o em seu devido lugar e evitando que o mesmo entre em contato com meios ácidos ou corrosivos. A rigidez e resistência, por sua vez, vem do reforço, e quanto maior sua abundância, maior a rigidez e resistência do compósito alcançado.

No que diz respeito às propriedades dos compósitos, percebe-se que elas dependem de propriedades físicas e de fatores inerentes às fases constituintes, como as suas quantidades relativas e a geometria da fase dispersa (Kelly,1982). Os fatores de que dependem as propriedades dos compósitos são apresentados na Figura 2.1.

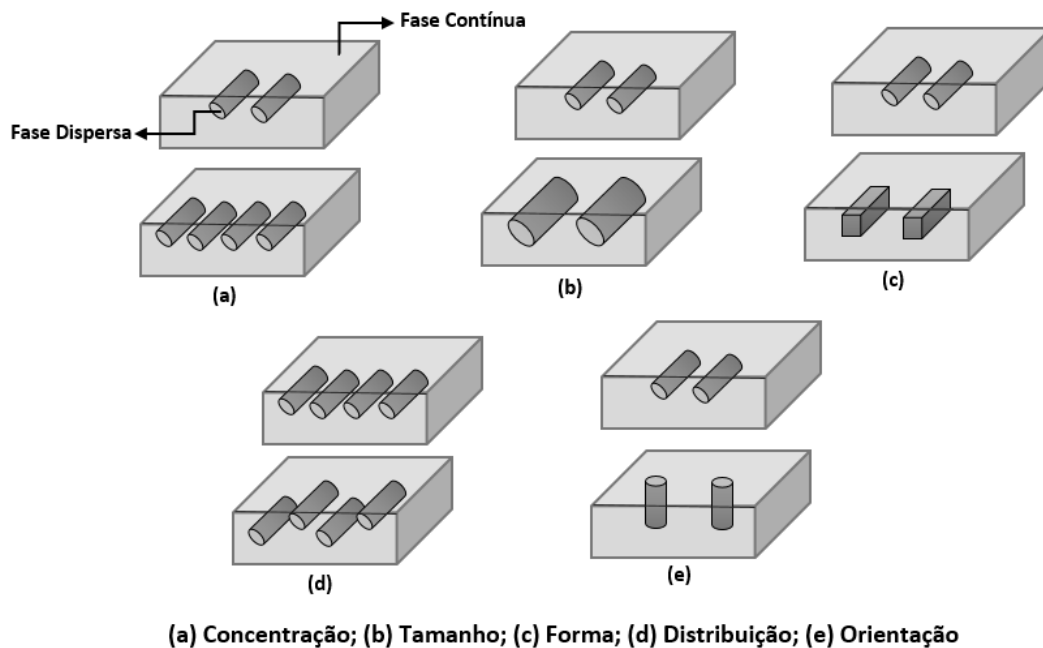


Figura 2.1 Fatores que influenciam nas propriedades dos compósitos  
Fonte: Kelly, 1982.

A Tabela 2.1 exibe a comparação entre os valores de peso e resistência de metais usualmente empregados em estruturas e alguns compósitos laminados.

Tabela 2.1 – Comparativos de propriedades dos metais e compósitos

Material	Peso específico ( $\text{Kg/m}^3 \times 10^3$ )	Módulo de Elasticidade (E) [GPa]
<i>Aço</i>	7,8	207
<i>Alumínio</i>	2,8	71
<i>Carbono/epóxi (E=300 Gpa) Vf (volume de fibra) = 55%</i>	1,5	167
<i>Kevlar49/Epoxi Vf = 55%</i>	1,4	76
<i>Fibra Vidro E/Epoxi Vf = 55%</i>	2,0	48

Fonte: Mello, 2005.

Quanto à classificação das fases, conforme Mourisco (1995), temos que as matrizes podem ser classificadas em Compósitos de Matriz Polimérica (CMP), Compósitos de Matrizes Metálicas (CMM) ou Compósitos de Matrizes Cerâmicas (CMC). Os reforços, por sua vez, podem ser organizados em particulados e fibrosos (fibras longas ou curtas) ou estruturais (laminados e painéis sanduíche).

### **2.1.2 Compósitos de matriz cerâmica**

De acordo Mourisco (1995), os compósitos de matriz cerâmica (CMCs) são largamente aplicados na construção civil, sendo o concreto o de maior uso. O concreto é formado por uma matriz de silicato reforçada por partículas (pedras) e/ou fibras metálicas (vergalhão). No entanto, os compósitos de matriz cerâmica mais evoluídos têm bom aproveitamento em altas temperaturas e geralmente temperaturas onde os metais não conseguem manter a resistência mecânica.

Dentre os problemas dos CMCs, Callister (2008) ressalta a fragilidade que tais materiais apresentam ao receber impactos e outras solicitações mecânicas à temperatura ambiente, as condições de processamento que limitam a utilização dos reforços e ainda a baixa condutibilidade térmica e a alta sensibilidade a choques térmicos no caso das cerâmicas amorfas.

Conforme Harris (1986), podemos citar as fibras cerâmicas longas e curtas de carbetto de silício, alumina e silicatos de boro como os principais tipos de reforços, e as matrizes mais comuns são de variados tipos de óxidos e silicetos, tais como alumina, carbetto de silício, zirconia, óxidos de magnésio e etc. Os processos de fabricação empregam na maioria das vezes a deposição química por vácuo ou a metalurgia do pó tradicional (compactação e sinterização).

### **2.1.3 Compósitos de matriz polimérica**

Watts (1980) alega que os compósitos de matriz polimérica (CMPs) ganharam popularidade nos últimos 30 anos devido as suas baixas densidades, elevadas resistências mecânicas e facilidades na fabricação. Inicialmente com finalidades aeroespaciais, pelo fato



de serem mais baratos, os CMPs foram rapidamente inseridos nos mais diversos ramos da indústria e, apesar de não nutrirem o mesmo nível de rigidez dos materiais metálicos a altas temperaturas, eles passaram a substituir os metais em numerosas aplicações sendo que as mais novas gerações destes compósitos conseguem garantir propriedades mecânicas admissíveis a temperaturas cada vez mais elevadas.

Os principais reforços e matrizes utilizados nos CMPs, e seus respectivos processos fabricação. De acordo com Mourisco (1995) os reforços mais usados nos CMP são as fibras longas e curtas e as mais conhecidas são: fibras de carbono, fibras de vidro, fibras e whiskers de SiC, fibras de alumina, fibras de aramide (polímero, ex. Nylon e Kevlar), fibras de boro, nitreto de silício e fibras de borosilicatos (fibra de boro revestida de SiC). Existe ainda uma grande variedade de formas para alguns tipos desses reforços como e o caso do Kevlar e das fibras de carbono onde pré-formas pode ser pré-fabricadas com geometrias mecanicamente adequadas para ser posteriormente utilizadas como reforços da matriz polimérica.

Arimond (1993) afirma que as resinas utilizadas nos CMP são muito variadas sendo que as mais utilizadas são: epoxy, polisulfônicas, polifenilsulfônicas, poliamídicas e fenólicas (estas duas últimas para mais altas temperaturas). 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.

#### **2.1.4 Compósitos de matriz metálica**

Compósitos de Matriz Metálica (CMM), como designa Mourisco (1995), são os materiais que apresentam como um de seus constituintes basilares um metal ou liga metálica, de modo que o outro componente, o reforço, esteja inserido no primeiro. Como exemplos de matrizes podemos citar o alumínio, magnésio, titânio; e de reforço é a alumina, carbetos de silício, fibras de aço, partículas de grafite etc.

No caso dos CMM, Mourisco (1995) aborda como critérios de seleção para o material cerâmico as seguintes propriedades: compatibilidade com a matriz, limite de resistência a tração, módulo de elasticidade, temperatura de fusão, densidade, estabilidade térmica, coeficiente de expansão térmica, tamanho e forma, e por último, custos e disponibilidades.

Herakovich (1998) descreve que, quanto aos reforços, os mais comuns nos CMM's são nos formatos de whiskers, fibras (curtas e longas) e partículas cerâmicas, onde se procura

combinar propriedades dos cerâmicos, tais como, elevados módulos de elasticidade, elevadas durezas (SiC, C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>C), com as dos metais (ductilidade, tenacidade, conformabilidade).

Segundo Chawla (1987), os metais mais frequentemente empregados como matriz de CMMs são os que apresentam baixas densidades, dentre outras características, devido sua principal aplicação ser estrutural e assim se buscar estruturas mais leves e mais resistentes. Ligas de alumínio, de níquel, magnésio, cromo e de molibdênio são exemplos de metais que estão em conformidade com as especificações descritas acima.

Bacon (1989) afirma que, se comparadas com as ligas metálicas produzidas de maneira convencional e sem levar em conta os tipos e formas de reforços, pode-se citar como vantagens obtidas com o desenvolvimento e utilização dos CMM's: a alta resistência ao cisalhamento, boa condutividade térmica, boa resistência à abrasão, atuação em altas temperaturas (mantém suas propriedades em temperaturas mais elevadas quando comparadas com as ligas tratáveis termicamente), a possibilidade de serem conformados e tratados como qualquer outra liga metálica, ou seja, possibilidade de serem pós processados. A influência da quantidade de reforço sobre o módulo de elasticidade dos compósitos pode ser vista na Figura 2.2.

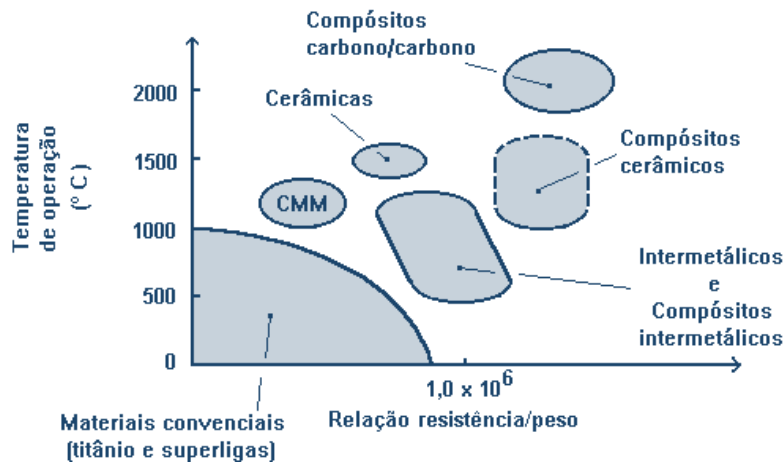


Figura 2.2 - Efeito da quantidade de reforço sobre o módulo de elasticidade do alumínio (adaptado)

Fonte: Taya, 1989.

Jesus (1998), ressalta que os CMM's têm muitas vantagens sobre os materiais convencionais, das quais podemos citar: maiores limites de resistência mecânica e módulo de elasticidade, melhores propriedades a altas temperaturas, baixo coeficiente de expansão

térmica e melhor resistência ao desgaste, entre outras. É graças a estas propriedades que estes materiais possuem um vasto patamar de aplicações.

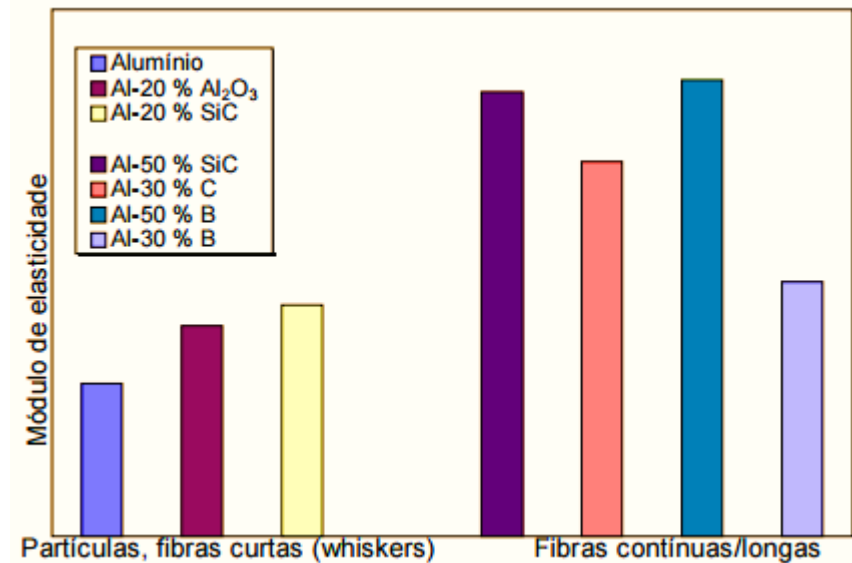


Figura 2.3 - Mapa de desempenho de vários materiais de engenharia, em termos de temperatura de operação (° C) e relação resistência/peso (adaptado)

Fonte: Mathews, 1994.

Para o reforço, Ventura (2009) alega que a classificação mais generalizada é feita em três categorias: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas (whiskers) e compósitos de fibras contínuas, a descrição esquemática dos tipos de compósitos de matriz metálica é exibida na Figura 2.4. Em regra, os componentes do reforço dos compósitos proporcionam força e rigidez, e também aumentam a resistência ao calor, corrosão e condutividade.

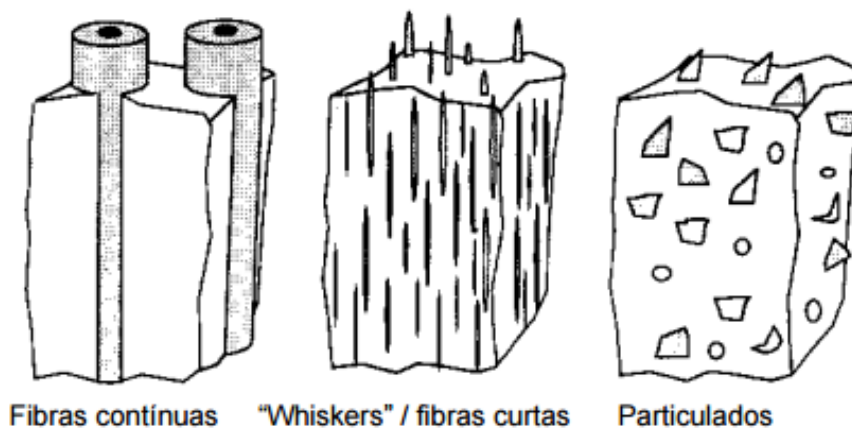


Figura 2.4 – Descrição esquemática dos três tipos de compósitos de matriz metálica classificados de acordo o reforço

Fonte: Cronjagen e Meister, 1998.

Conforme afirma Ventura (2009), o reforço pode ser feito para facultar todas ou apenas uma das características (resistência e rigidez, condutividade, resistência ao calor e corrosão) dependendo dos requisitos exigidos pelo material final. Para a utilização do reforço ser vantajosa, o mesmo deve ser mais forte e rígido que a matriz. Deste modo, interação satisfatória entre matriz e reforço pode ser garantida pela concepção de uma interface entre ambos que possa ajustar a rigidez do reforço com a ductilidade da matriz.

As fibras formam uma classe importante de reforço uma vez que propiciam o aumento da força da matriz, e, por conseguinte influenciam e realçam as qualidades pretendidas das duas fases. De acordo Fiorelli (2002), as mais antigas e mais conhecidas como reforço, são as fibras de vidro, sendo que posteriormente foram descobertas as fibras metálicas e cerâmicas, usadas para tornar os compósitos mais rígidos e resistentes ao calor.

Com relação à desenvoltura do compósito reforçado com fibra, Ventura (2009) diz, “A performance do compósito reforçado com fibras é avaliada pelo comprimento, forma, orientação, e composição das fibras bem como pelas propriedades mecânicas da matriz. O arranjo das fibras em relação umas às outras, a concentração das fibras e a sua distribuição influenciam significativamente a resistência e outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras”.

Com relação à orientação das fibras, JOSEPH (1999) garantem que é possível obter as seguintes configurações: alinhamento paralelo ao eixo longitudinal da fibra em uma única direção e alinhamento totalmente aleatório. Geralmente, as fibras contínuas mantêm-se alinhadas enquanto as fibras descontínuas podem estar desalinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas, é possível visualizar o arranjo e orientação de compósitos fibrosos na Figura 2.5.

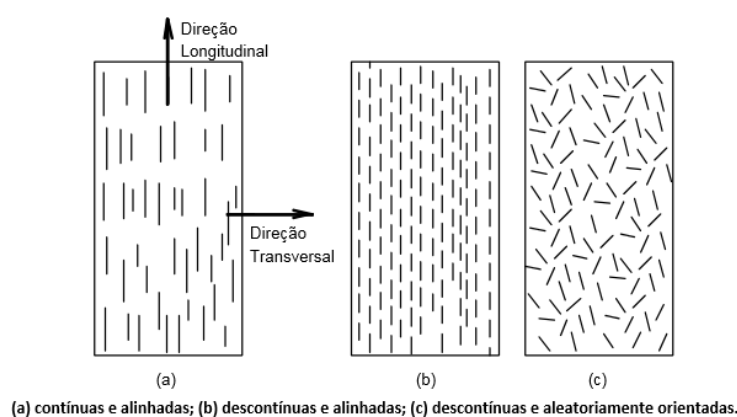


Figura 2.5 – Arranjo dos compósitos reforçados com fibra  
Fonte: Mello, 2005.

No geral, a melhor combinação das propriedades dos compósitos reforçados com fibras (FRC – Fiber Reinforced Composites) é alcançada quando a sua distribuição é uniforme. A resposta mecânica dos compósitos com fibras contínuas e alinhadas dependem de fatores como o comportamento tensão-deformação das fases fibra e matriz, as frações volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada.

Já os compósitos com fibras descontínuas e aleatórias são empregados onde as tensões são totalmente multidirecionais. A eficiência deste tipo de compósito é muito inferior se comparada a dos compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas na direção longitudinal. Embora os compósitos com fibras descontínuas e alinhadas tenham uma eficiência de reforço menor que os compósitos com fibras contínuas, estes vem sendo cada vez mais utilizados nas mais diversas áreas. Apesar de fibras de vidro picadas serem as mais frequentes no uso como reforço, as fibras descontínuas de carbono e aramida vem ganhando espaço na construção de estruturas.

Os custos de produção de fibras descontínuas, curtas, alinhadas ou com orientação aleatória são consideravelmente menores do que os de fibras contínuas e alinhadas. Tendo em vista que formas complexas podem ser moldadas com fibras descontínuas, o que nem sempre é possível quando se utiliza um reforço com fibras contínuas, as taxas de produção dos compósitos utilizando materiais descontínuos são elevadas. Todavia, a orientação e comprimento da fibra para um certo compósito dependem do nível e natureza da tensão aplicada, bem como dos custos de fabricação (VENTURA 2009).

De um modo geral, as dimensões das partículas de reforço são de ordem de poucos micrômetros e a concentração em volume é superior a 20%. Além das propriedades da matriz, o diâmetro e o espaçamento entre as partículas e a fração de volume do reforço influenciam no comportamento do compósito. São conhecidas várias formas de partículas entre elas quadradas, triangulares e redondas, mas as dimensões observadas de todos os lados de certa forma não variam. Na figura 2.6 podemos ver de forma esquematizada a classificação dos compostos segundo o reforço.



Figura 2.6 – Classificação de materiais compósitos segundo o reforço  
 Fonte: Kelly, 1982.

### 2.1.5 Emprego na indústria

Diante da crescente exigência das novas tecnologias, sobretudo no que diz respeito à combinação de características incompatíveis de vários materiais, como a resistência mecânica e tenacidade acarretaram no desenvolvimento de técnicas que melhorem os materiais existentes. Como ressalta Silvestre Filho (2001), os compósitos são exemplos destes materiais que tem aproveitamento variado na indústria e são aplicados com o intuito de melhorar a produtividade, diminuir os custos e facultar diferentes propriedades aos materiais. Callister (2008) afirma também que estes materiais vêm ganhando espaço, e atuam como substitutos de materiais convencionais dado que oferecem benefícios como: elevada rigidez e módulo

específico, elevada resistência à corrosão e condutividade térmica, boa fluidez, estabilidade estrutural e fácil moldagem.

Conforme ressalta Herakovich (1998), determinadas combinações de reforços são imensamente reativas a elevadas temperaturas. Uma solução para esse problema, uma vez que o compósito pode ser danificado durante o seu fabrico se exposto a temperaturas elevadas, é fazer a aplicação de um revestimento superficial, que proteja de proteção ao reforço ou pela alteração da liga.

Segundo Rezende (2000), o início do desenvolvimento dos compósitos de matriz metálica, foco desse trabalho, deu-se por volta da década de 60 com a produção fibras de boro e de carboneto de silício para reforçar metais leves, particularmente ligas de alumínio, e, durante a década de 70, os Estados Unidos iniciou suas pesquisas na aplicação de compósitos de matriz metálica em lançadores de mísseis e aeronaves militares. Hoje, muitos dos compósitos de matriz metálica estão ainda sendo desenvolvidos, porém com menor intensidade em relação aos de matriz polimérica.

Apesar do uso de compósitos de matriz cerâmica ainda ser bastante restrito, de acordo Faria (2014) temos como exemplos pontuais do uso de tais materiais, a substituição de uma roldana em ferro fundido pelo compósito alumínio/fibras curtas de  $Al_2O_3+SiO_2$ , realizada pela empresa Toyota que efetuou, e a fábrica Honda que pretendeu aumentar a resistência ao desgaste e às altas temperaturas no revestimento dos cilindros do motor, através do uso de um compósito com matriz de alumínio contendo 12% de fibras de  $Al_2O_3$  + 9% de fibras de grafite. Ainda conforme o autor, outro exemplo de compósito com matriz metálica é a substituição do ferro fundido pela liga de alumínio, desta vez Al-SiC, com reforço de 20% SiC (carbeto de silício), em discos de freio.

Ventura (2009) ressalta que a introdução dos compósitos de matriz metálica em componentes automotivos incide principalmente por meio de ligas de alumínio, que elevam a resistência desses materiais e aproveitam o seu potencial satisfatório de redução de peso.

Contudo, vale ressaltar que apesar da maioria dos metais e ligas constituírem boas matrizes, as matrizes metálicas apresentam algumas limitações no que diz respeito à aplicação em baixas temperaturas, uma vez que o uso é bem restrito. Apenas os metais leves e com baixa densidade como o titânio, o alumínio e o magnésio exibem propriedades relevantes para aplicações aeroespaciais. É, portanto, neste patamar que as matrizes metálicas apresentam grande potencial.

Com a ascensão da indústria aeronáutica e aeroespacial, Rezende (2007) alega que aumentou a demanda por materiais cada vez mais leves e mais resistentes, com maior relação resistência/peso, maior módulo de elasticidade específica ( $E/p$ ,  $p$ =peso específico) e atuação superior em condições de trabalho em que são exigidas ótimas propriedades mecânicas a altas temperaturas concomitantes à resistência a corrosão, tenacidade e outros parâmetros (peso, dureza, condutividade, etc). Dessa forma, os estudos que permearam o desenvolvimento dos materiais compósitos foram intensificados. O emprego de compósitos na fabricação de aviões é datado da Segunda Guerra Mundial, onde, em meados dos anos 1950, fabricantes europeus de planador de alto desempenho já empregavam a fibra de vidro como material para as estruturas primárias.

Conforme aborda Rezende (2000), foi a partir da década de 60, que compósitos de alta desenvoltura foram introduzidos de maneira definitiva no ramo aeroespacial. O desenvolvimento de fibras utilizando carbono, boro e quartzo ofereceram ao mercado a oportunidade de flexibilização de projetos estruturais que vieram a atender as necessidades de desempenho em voo de aeronaves e veículos de reentrada na atmosfera terrestre. Além disso, os avanços em pesquisas relacionadas a esses materiais configuraram a abertura de novas oportunidades para estruturas de alto desempenho e baixo peso, que favoreceu o incremento de sistemas estratégicos, como foguetes e aeronaves de geometrias complexas.

A facilidade no acesso e emprego das técnicas de fabrico requeridas por cada setor industrial é que guiam o sucesso de cada compósito. Cada vez mais, a produção de compósitos fundamenta um processo que visa atingir valores ótimos de parâmetros como peso, forma, durabilidade, resistência, custos, rigidez, etc. Logo, a ascensão de novas tecnologias de fabrico desses materiais é acompanhada pela mudança e muitas vezes, do melhoramento destes mesmos parâmetros.

Faria (2014) afirma também que uma propriedade bastante proveitosa para aplicações aeronáuticas, aeroespaciais e também automotivas dos compósitos é sua competência de atenuar vibrações. Por exemplo, a capacidade de amortecimento de vibrações que possuem os compósitos de matriz polimérica é semelhante à do ferro fundido, o que é relativamente interessante.

Ventura (2009) traz que, a utilização de materiais compósitos reforçados em diversas aplicações das indústrias navais e de construção civil tem aumentado continuamente nos últimos anos em comparação com os materiais tradicionais. As principais aplicações consistem na reparação e reforço estrutural com compósitos FRP por serem mais leves, de



fácil e rápida aplicação, mais resistentes à agressividade do meio ambiente e por possuírem maior resistência à tração.

De acordo Rezende (2000), a recente preocupação com a criação de componentes em compósitos estruturais é de correlacionar as propriedades, o desempenho estrutural e os diferentes processos de produção com a redução de custos.

Face a esse contexto, os processos de manufatura que proporcionem maior produtividade com custos reduzidos e qualidade compatível as aplicações do produto final estão sendo investigados. Com isto, os compósitos avançados têm aumentado as suas aplicações em outras áreas da engenharia, ao nível mundial, e como exemplos podemos citar os setores de transporte, artigos esportivos, médicos e, mais recentemente, na área da engenharia de construção.

### **2.1.6 Economia e impacto ambiental**

De acordo Marinelli (2008), nos últimos anos surgiu um grande interesse mundial pela criação de novas tecnologias que possibilitem o uso de produtos com menor impacto ambiental. Neste contexto, os materiais sintéticos têm recebido uma atenção especial por semearem várias questões que merecem foco, principalmente relacionadas a não-biodegradabilidade e a dificuldade de reciclagem, que por sua vez culmina na geração de lixões, e acúmulo excessivo deste de material em depósitos e na própria natureza.

À procura de soluções para esse problema, um notório número de pesquisas e trabalhos na área de compósitos foram e estão sendo concretizados a fim de permear a preservação ambiental e proporcionar um padrão de vida melhor e mais sustentável para todas as classes sociais.

Ainda conforme Marinelli (2008), dentre as pesquisas nesta área, as que estão em ascensão e se destacam são aquelas buscam a aplicação para modificadores naturais, principalmente quanto à utilização de fibras naturais.

Nesse contexto, pode-se destacar a importância do aproveitamento de rejeitos industriais e materiais recicláveis na formulação de compósitos. Como exemplos dessa aplicação, conforme Bonelli (2005), “tem-se o uso de piaçava como reforço em matrizes de poliéster insaturado e polietileno de alta densidade reciclado, de modo que a fibra de piaçava pode ser empregada como reforçadora em compósitos de matriz polimérica”. E ainda a

aplicação de escórias de alto forno na criação de compósitos metálicos, enfoque do presente trabalho.

Sabendo-se que, através da combinação de materiais com características físico-químicas e mecânicas diferentes, associada ao emprego de diferentes processos de manufatura, obtém-se os compósitos avançados que necessita desempenhar funções estruturais cada vez mais exigentes, a concepção de trabalhos de pesquisa nesta área se faz cada vez mais importante. Como afirmam MARTINS (2009), a utilização crescente dos compósitos vem estimulando a formação de recursos humanos mais capacitados, de modo que os desafios da obtenção de componentes com funções múltiplas alcancem o êxito.

## **2.2 ALUMÍNIO**

A presença constante do alumínio em nosso cotidiano e seu grande aproveitamento na indústria popularizou o metal. Quanto ao seu emprego e valor econômico na contemporaneidade, podemos citar o setor de transportes (automóveis, aeronaves, trens, navios), construção civil (fachadas, janelas, portas), eletroeletrônico (equipamentos elétricos, transmissão de energia), petroquímico, metalúrgico, tratamento para obtenção de água potável, o tingimento de tecidos e a presença em móveis, brinquedos, utensílios, embalagens, cosméticos e fármacos. Vale destacar que a reciclagem de embalagens de alumínio, ramo de destaque brasileiro, tem papel proeminente do ponto de vista econômico, social e ambiental.

Mesmo com a ductilidade elevada, Lamminen (2005), afirma que o alumínio puro é um metal que oferecer elasticamente baixa resistência mecânica. Porém, através da inserção de um ou mais elementos de liga, sua resistência pode ser substancialmente aumentada com os valores de ductilidade mantidos em padrões bem aceitáveis.

De acordo a ALCAN Alumínio do Brasil S/A, (1993), a maioria das aplicações das ligas de alumínio é projetada embasada nas propriedades a temperatura ambiente, embora certas normas admitam a redução de valores de tensões aceitáveis de projeto com o aumento da temperatura, uma vez que, como a maioria dos metais, o alumínio perde resistência em temperaturas elevadas.

Mello (2005) afirma que a resistência do alumínio aumenta em baixas temperaturas, sem que ocorra a perda de ductilidade e tenacidade, razão pela qual seu uso em aplicações criogênicas tem sido cada vez mais crescente.

De acordo Gomes (2001), existem atualmente no mercado ligas de alumínio com resistência mecânica de até 600 N/mm<sup>2</sup>, que possibilitam a melhoria das características de eficiência de projeto e podem contribuir para o aumento da velocidade de produção.

Ainda conforme Gomes (2001), um dos principais atributos das ligas de alumínio é a boa usinabilidade no fresamento, fator diferencial na escolha da liga, uma vez que esses processos são relevantes no chão-de-fábrica.

O peso específico do alumínio é de aproximadamente 1/3 do peso do aço, o que possibilita um melhor manuseio e utilização do material (tabela 2.2).

Do ponto de vista da engenharia, a densidade é uma das características físicas mais interessante e mais conhecida do alumínio, e como pôde ser visto na tabela 2.2 é a menor dentre os materiais listados, com exceção do magnésio. Essa baixa densidade torna o alumínio competitivo em relação aos outros materiais no que diz respeito ao peso, mesmo quando esses materiais demonstram melhores propriedades volumétricas. Se comparada a densidade do aço, que é cerca de três vezes maior, o alumínio apresenta maior facilidade quanto aos procedimentos de soldagem (manuseio das lâminas e subconjuntos), mesmo com diferenças marcantes, principalmente em relação procedimentos e custos, o que vem a ser um fator decisório na escolha do alumínio.

Tabela 2.2 – Propriedades físicas e mecânicas do aço e das ligas de alumínio

<b>Material</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ponto de Fusão (°C)</b>
<i>Alumínio</i>	2700	660
<i>Titânio</i>	4500	1600
<i>Aço</i>	7800	1350
<i>Aço Inox – 304</i>	7880	1426
<i>Bronze 65/35</i>	8430	930
<i>Cobre</i>	8925	1083
<i>Magnésio</i>	1740	651

Fonte: Copper and Brass Sales

Segundo DA COSTA (2001), as ligas de alumínio, sobretudo aquelas endurecíveis por precipitação são as mais usadas nas pesquisas sobre materiais obtidos via metalurgia do pó (P/M) de alta resistência, com enfoque nas aplicações na indústria aeronáutica e automobilística, e também como matrizes de compósitos de matriz metálica.

O emprego do alumínio na metalurgia do pó foi densamente impulsionado pela utilização de ligas que formam eutéticos de baixo ponto de fusão, conforme dados do Grupo setorial da metalurgia do pó, viabilizando a sinterização com fase líquida e resultando em ligas com alto desempenho. Razões estas que estimulam o desenvolvimento de novas ligas e técnicas de fabricação e o aprimoramento de tecnologias com o natural aumento do desempenho destes materiais.

### 2.3 ESCÓRIA

A apreensão mundial acerca do desenvolvimento sustentável vem impondo restrições quanto à emissão de gases na atmosfera e ao uso de matérias-primas não renováveis. Visto isso, nos últimos anos, a indústria vem buscando alinhar seus interesses à essas necessidades sustentáveis e, para isso, vem realizando mudanças na composição de seus produtos. Tais mudanças admitiram o aumento no teor dos acréscimos de minerais habituais, como a escória de alto forno (HENRIQUES 2004).

A escória de alto-forno é um subproduto gerado a partir da fabricação do ferro gusa em unidade industrial conhecidas como altos-fornos, através da fusão do combinado, minério de ferro e impurezas (ganga), com os fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque, por meio de um aparato de reações químicas (MASSUCATO, 2005).

Velten (2006), alega sobre a definição da escória de alto-forno, que ela é um resíduo siderúrgico industrial composto basicamente de alumínio silicatos cálcicos, vinda da combinação da ganga do minério de ferro com as cinzas do coque e do calcário empregado como fundentes na técnica siderúrgica da produção do ferro gusa (ferro fundido).

Conforme Piau (1995), escórias são qualificadas como resíduos da indústria do aço e ferro, que possuem em sua composição neutralizantes, especialmente Ca, Mg, Si e metais não nocivos ao solo e a vegetação.

ÂNGULO (2001) afirmam que na concepção de ferro gusa realizada em altos-fornos, os óxidos contidos nos minerais de ferro são reduzidos e abstraem-se as impurezas que os acompanham. Essa separação ocorre devido à diferença de densidades dos materiais envolvidos, onde, a escória com densidade de aproximadamente 2,8g/cm<sup>3</sup>, inferior ao gusa que é 7g/cm<sup>3</sup>, se aloca em uma “camada superior”, sendo drenada em intervalos regulares.

A aplicação em patamar industrial da escória de alto forno, no início, encontrou enormes resistências por parte dos técnicos e fabricantes. Conforme Coutinho (1997) foi

somente após a Primeira Guerra Mundial que se desenvolveu ao incremento no emprego de escórias. Esse crescimento deveu-se principalmente pela decorrência da crise do carvão, uma vez que se consegue uma evidente economia de combustível com o emprego da escória.

De acordo Jacomino (2002), a escória possui aplicação hidráulica, caso se apresente no estado amorfo. Esta disposição química é obtida por meio de um resfriamento rápido, na qual a escória no estado líquido a 1500°C atinge a temperatura de 200 °C, impedindo cooptações dos átomos segundo as próprias afinidades (estado cristalino). O processo de resfriamento brusco que a escória líquida passa é denominado granulação.

O processo de resfriamento da escória de alto-forno, somado a sua composição química são fatores determinantes na sua capacidade aglomerante. A respeito do resfriamento, Velten (2006) alega que, quando submetida à granulação, resfriamento brusco na saída do alto-forno, a escória demonstra propriedades hidráulicas latentes, assumindo o aspecto vítreo; contudo, se o processo de resfriamento for lento, a escória se cristaliza e resulta em um produto que não manifesta atividade hidráulica. Dessa forma, a reatividade da escoria de alto-forno está associada à sua forma de obtenção no estado vítreo. Contudo, vale ressaltar que a condição vítrea não é suficiente para a utilização da escória como aglomerante, pois é necessário que ela seja solúvel, de modo que aconteça a liberação em meio aquoso, dos elementos que dão origem aos compostos hidráulicos.

A respeito da solubilidade da escória, Cincotto (1992), afirma que ela é beneficiada pelo teor de óxido de cálcio encontrado na mesma. Dessa maneira, a reação lenta pode ser acelerada se colocada em meio fortemente alcalino, ou através da ação de sulfatos (ou de ambos), de modo que a finura da escória também favoreça a reação.

Além da granulação, há a cristalização, processo lento, em que a escória é resfriada ao ar em pátios adequados, forma distintas fases cristalinas, que acarretam na perda do poder de aglomerante hidráulico. Forma-se então a Escória Bruta de Alto-Forno, que pode ser usada como material inerte em várias aplicações, substituindo materiais pétreos ou podendo ser britada (Acerlomittal Tubarão).

A presença de pequenos cristais na escória de alto-forno é bastante comum, e esses podem ser observados através de um microscópio óptico. Caso o cristal se encontre envolto pela fase amorfa, a interferência do mesmo na reatividade desta fase será praticamente nula.

A composição química do material é um fator importante, visto que determina as características físico-químicas dos tipos de escória. Os elementos envolvidos são os óxidos de cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al) e magnésio (Mg); e em menor quantidade Feo, MnO,

TiO<sub>2</sub>, enxofre, etc., variando as quantidades dentro de limites relativamente estreitos (MASSUCATO, 2005).

Do aproveitamento encontrado para as escórias, podemos citar o agregado para concreto, cimento, bases de estrada, asfalto, aterro, metais e aplicações especiais em lâ mineral, lastro ferroviário, material para cobertura, isolamento, vidro, filtros, condicionamento de solo e produtos de concreto.

Além das aplicações já citadas, a escória de alto-forno, também pode ser empregada na fabricação de argila, bases de estrada e asfalto, adição no concreto para melhorias de propriedades mecânicas, aterro/terraplanagem e ainda aplicações especiais como: filtros; isolamento e lastros ferroviários.

A escória de alto forno a carvão é um lixo industrial, vindo de resíduos siderúrgicos da produção do Ferro Gusa. Ao empregar esse componente como reforço de uma liga metálica na formulação de compósitos, a escória deixa de ser um poluente e passa a agregar melhorias das propriedades mecânicas do novo material, além de fazer com que o custo da matéria-prima do compósito seja baixo.

Face às vantagens trazidas pelo uso da escória de carvão vegetal, associada ao ainda, restrito emprego como reforço de uma liga metálica, fica evidente que esse trabalho traz mais uma aplicação inovadora e promissora para a escória de alto forno a carvão vegetal.

## **2.4 METALURGIA DO PÓ**

O processo utilizado para obter a liga em estudo foi à metalurgia do pó, assim é preciso conhecer este processo de forma a esclarecer questões acerca das propriedades esperadas do material, além de permitir o mapeamento das análises presentes neste trabalho identificando as simplificações e considerações feitas a fim de tratar esses pontos como indicativos para melhorias do estudo realizado e da aproximação entre o comportamento estimado e o observado na liga produzida.

A utilização da tecnologia da metalurgia do pó já está totalmente consolidada na indústria, no entanto o processo é relativamente novo e só a partir da década de 20 com o surgimento dos compósitos conhecidos como “metal duro” houve um crescente uso dessa técnica e depois da Segunda Grande Guerra Mundial sua expansão foi ampliada com o

desenvolvimento de novos procedimentos como a compactação isostática (Grupo Setorial de Metalurgia do pó).

A metalurgia do pó consiste numa técnica de produção de peças metálicas a partir de metais e suas ligas reduzidas ao estado pulverizado. Os pós são convenientemente misturados, submetidos a uma operação de compactação, utilizando matrizes com a forma e dimensões definitivas ou praticamente definitivas. Em seguida, os compactados são a seguir sinterizados, ou seja, aquecidos em condições controladas de temperatura, tempo, ambiente, de modo a produzir uma consolidação das peças e conferir a estrutura, densidade e propriedades mecânicas desejadas (CHIAVERINE, 1986).

Através da utilização de pós metálicos e não-metálicos como matéria prima o processo de metalurgia do pó obtém componentes com ausência de fase líquida ou com presença parcial, sendo, portanto, uma técnica de fabricação muito diferente dos processos metalúrgicos convencionais. O que se tem é um produto com forma desejada, bom acabamento superficial, propriedades mecânicas e composição química controladas. As etapas principais que envolvem o processo são apresentadas abaixo no fluxograma da figura 2.7 a seguir.



Figura 2.7 - Fluxograma simplificado da fabricação de peças por Metalurgia do Pó  
Fonte: Zanata, 2007. Adaptado pelo Autor

Em síntese, a utilização da metalurgia do pó deve ser justificada basicamente por dois aspectos principais, como ressalta Iervolino (2009). Em primeiro lugar observa-se se este processo é a única opção tecnicamente viável de fabricação de um determinado produto, um exemplo disso são as cerâmicas, metal-duro, imãs, filamentos de lâmpadas que só podem ser

obtidos por meio deste processo. O outro aspecto é a viabilidade na produção de determinado produto, este item por sua vez se divide em outros fatores, são eles: formato da peça; tamanho da peça; tolerâncias geométricas; composição do material; aplicação e ambiente de trabalho; propriedades mecânicas exigidas; tamanho do lote a ser fabricado.

Das vantagens da metalurgia do pó, podemos citar o baixo consumo energético do processo e o elevado aproveitamento de matéria prima, se comparado aos processos metalúrgicos convencionais. Na figura 2.8 pode ser visto o comparativo dos processos convencionais com a metalurgia do pó.



Figura 2.8 – Diagrama comparativo dos processos metalúrgicos convencionais com a metalurgia do pó

Fonte: Grupo setorial da metalurgia do pó

Gradualmente, a metalurgia do pó vem ganhando espaço e atualmente se consolida como uma técnica vantajosa em relação aos processos convencionais, desde que as séries a serem produzidas justifiquem o elevado custo das matrizes e que sejam cumpridos alguns requisitos em relação às formas e dimensões das peças (Grupo setorial da metalurgia do pó).

#### 2.4.1 Características dos materiais sinterizados

Como pontua Loberto (2009) a alteração na composição dos diversos pós metálicos utilizados no processo de fabricação do sinterizado, permitem que uma imensa variedade de materiais possa ser obtidos, apresentando assim as mais variadas características físicas e



metalúrgicas proporcionando à fabricação de inúmeros produtos que atendam de forma satisfatórias as exigências do mercado.

Ainda segundo Loberto (2009) a maioria das misturas utilizadas na compactação são preparadas a partir dos seguintes tipos de pós: elementares; pré-difundidos; pré-ligados. Vale ressaltar que estes pós podem ser combinados entre si.

- Elementares: Quando os elementos de liga usados na mistura são adicionados uso pós básicos sem ligação metalúrgica entre os componentes. A vantagem destes tipos de pós é a boa compressibilidade, em contrapartida quando misturados são suscetíveis a segregação.
- Pré-difundidos: Neste caso os elementos de liga estão parcialmente conectados ao pó base. Após a sinterização estes pós apresentam uma microestrutura heterogênea, um controle dimensional satisfatório e ótimas propriedades mecânicas, sendo também menos suscetíveis a segregação.
- Pré-ligados: Os elementos de liga são fundidos junto com o metal base o que gera uma excelente propriedade mecânica, porém tem menor compressibilidade o que restringe o uso de peças com densidades inferiores a  $7,0 \text{ g/cm}^3$ . A vantagem dos pós pré-ligados está relacionada à maior homogeneidade das partículas unitárias. O elemento de liga está distribuído uniformemente pelas partículas, produzindo sinterizados com elevada homogeneidade química (ENGSTROM 1980).

As propriedades mecânicas objetivadas na produção de determinados componentes devem ser bem especificadas levando em conta a interdependência entre algumas propriedades, além disso, faz-se necessário explicitar aquelas consideradas fundamentais, uma vez que as possibilidades do uso do sinterizado são diversas e é preciso determinar com precisão as variáveis de controle a serem variadas para alcance satisfatório do desempenho das peças.

A maioria das propriedades mecânicas de uma peça obtida por metalurgia do pó dependem diretamente da densidade, geralmente a densidade é medida em termos relativos a quantidade dos poros presentes, ou seja, a densidade é expressa em densidade relativa que é a relação entre a densidade da peça e a sua equivalente sem poros. Na prática são consideradas peças com baixa densidade aquelas com densidade relativa inferior a 75% e acima de 90% são consideradas de alta densidade (FILHO, 2009).

Segundo Filho (2009) peças estruturais possuem densidade relativa que variam de 80 a 95%, enquanto que buchas auto-lubrificantes usualmente apresentam densidade relativa da

ordem de 75% e filtros de 50%. Enquanto que para materiais que apresentam densidade relativa a partir de 98%, estes normalmente são obtidos por processos de sinterização com presença de fase líquida, compactação isostática a quente ou moldagem por injeção.

## 2.4.2 Pós Metálicos

De maneira geral a obtenção da matéria prima, no caso, o pó metálico, pode ser dividida em processos mecânicos e químicos. Destacam-se nos processos mecânicos a moagem e atomização. No processo de atomização a quantidade obtida de pós é maior, sendo a mais disseminada na indústria.

Conforme representado na Figura 2.9, a obtenção do pó se dá forçando o metal líquido por um orifício, na saída esse fluxo é desintegrado por um jato de água, ar ou gás. O metal então solidifica imediatamente pela ação do jato e pela expansão ao deixar o bocal. Como resultado, pós com diferentes granulométricas e morfologias são obtidos (ZANATTA, 2007).

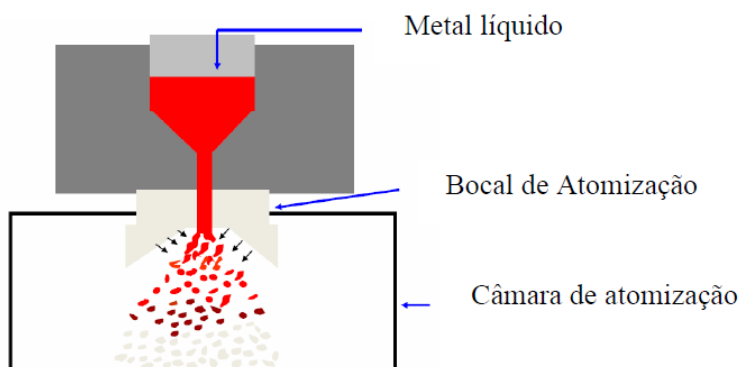


Figura 2.9 - Representação Esquemática de atomizador de pós-metálicos  
Fonte: Fredei, 2010

As principais características que diferenciam o pó atomizado de outros métodos, tais quais, eletrolise, redução, precipitação, etc. é o seu formato e densidade. Pode-se dizer que estes pós são livres de porosidade interna e que são relativamente compactos, com alta densidade batida e baixa área de superfície quando comparando os outros tipos de pós. Isto implica diretamente em boa escoabilidade, boa compressibilidade do que os demais (ORLANDIN, 2009).

O processo de moagem pode ser dividido para materiais frágeis e dúcteis, no processo de moagem em moinho de esferas, clássico na indústria, também conhecido como moagem de

baixa energia é indicado para materiais frágeis. Já a mistura ou moagem dos pós para a obtenção de pós e ligas de materiais dúcteis é conhecida como Moagem de alta energia.

Na moagem de materiais dúcteis o uso de moinhos convencionais pode levar a tendência de soldagem a frio das partículas de pó, o que provocaria uma baixa eficiência no processo comum. Dessa forma, ao invés de usar um moinho convencional são escolhidas diferentes configurações do processo. O moinho atritor e o moinho planetário por sua vez são os mais utilizados, possibilitando o processo de moagem de três diferentes combinações: sistemas dúctil-dúctil, dúctil-frágil e frágil-frágil. O moinho atritor consiste de uma cuba com um impulsor inserido na cuba, conforme apresentado na Figura 2.10. Vale ressaltar que para evitar o aquecimento do pó, a cuba normalmente é refrigerada com água. Também é possível o controle da atmosfera, pela substituição da atmosfera normal por injeção de gás inerte.

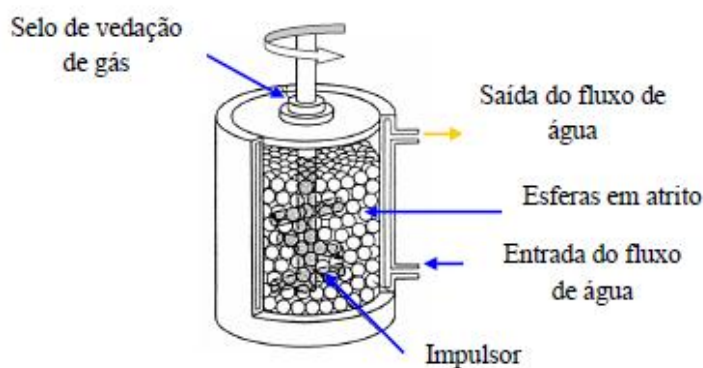


Figura 2.10- Vista de uma cuba de um moinho atritor  
Fonte: Suryanarayana, 2001

No que concerne à distribuição de reforço na matriz, a microestrutura depende fortemente dos parâmetros de moagem, tais como tamanho das bolas, número de bolas e tempo de moagem. Em estudos realizados, Zebarjad e Sajjadi (2006) concluíram que propriedades como compressão, micro dureza, resistência ao desgaste, estabilidade térmica e resistividade elétrica estão intimamente ligadas ao tempo de moagem. E a partir de determinado tempo de moagem, essas propriedades não são mais afetadas. Através de um único passo é possível produzir compósito de matriz de alumínio através de ligação mecânica. Adicionalmente, o processo não só melhora a distribuição e homogeneidade da fase dispersa na matriz comparada com a mistura convencional, mas também melhora as propriedades mecânicas (RUIZ-NAVAS, 2006).

As propriedades funcionais dos componentes finais obtidos por metalurgia do pó estão intimamente ligadas a qualidade dos pós metálicos e estes afetam diretamente os processos de compactação e sinterização. Os pós-metálicos utilizados na produção de componentes

sinterizados podem ser caracterizados por três tipos de propriedades, são elas: propriedades metalúrgicas, geométricas e mecânicas.

Na determinação das propriedades metalúrgicas são aplicadas técnicas de análise de composição química e também procedimentos metalográficos, para avaliar a presença de impurezas que afetam a compressibilidade e diminuem a vida útil das ferramentas de compactação.

A distribuição granulométrica afeta diretamente a as propriedades geométricas, ela é determinada pelo percentual distribuído ao longo de uma sequência de peneiras, caso o tamanho médio de partículas esteja acima de  $45\mu\text{m}$ , já os pós-metálicos que possuem tamanho médio inferior a  $45\mu\text{m}$  devem ser analisados quanto a granulométrica pelo método de difração a laser por suspensão em água. A estrutura interna possui relação direta com a porosidade.

As propriedades mecânicas podem ser avaliadas por: escoamento; densidade aparente; compressibilidade, pressão de extração, resistência verde e Spring-back. Vale ressaltar que muitas dessas propriedades se inter-relacionam e a forma mais adequada de avaliação é associar todas estas propriedades conjuntamente (Metals Handbook,1994).

### **2.4.3 Mistura**

A operação de mistura consiste em obter homogeneização das diversas materiais primas que irão formar o material sinterizado, o que inclui os pós metálicos, elementos de ligas, lubrificantes. A mistura deve atender à composição química especificada, além de se adequar às demais propriedades desejadas para a mistura de pós, tais como densidade aparente e escoabilidade.

Segundo Carvalho (2009), pequenas variações na granulometria de pós e flutuação nas concentrações de componentes da mistura de pós afetam sensivelmente as propriedades das misturas. A flutuação da composição química ou granulometria pode ser designada, em casos de maior intensidade, como segregação.

Os principais fatores para segregação em misturas são: diferença de escoabilidade causada pelas propriedades dos pós e gradientes de velocidade causados pela mistura, manuseio, transporte ou movimentação de materiais. As propriedades que podem ser afetadas pela segregação vão desde a escoabilidade a força de extração na compactação, com possíveis

reflexos no desempenho obtido na retirada de lubrificantes e na variação dimensional na sinterização e até na resistência mecânica do material.

Materiais de baixa densidade tendem a flutuar e se situar na região do topo da mistura, enquanto os componentes de alta densidade tendem a afundar na direção do fundo da mistura. Essa situação se agrava quando as partículas de maior densidade são grosseiras e as de menor densidade são as mais finas. Em contrapartida, se o material mais denso for mais grosseiro, os efeitos das diferenças de densidade e tamanho de partículas podem se compensar, abaixo uma representação dos diferentes graus de homogeneização da mistura de pós. Na figura 2.11 é possível visualizar diferentes graus de homogeneização.

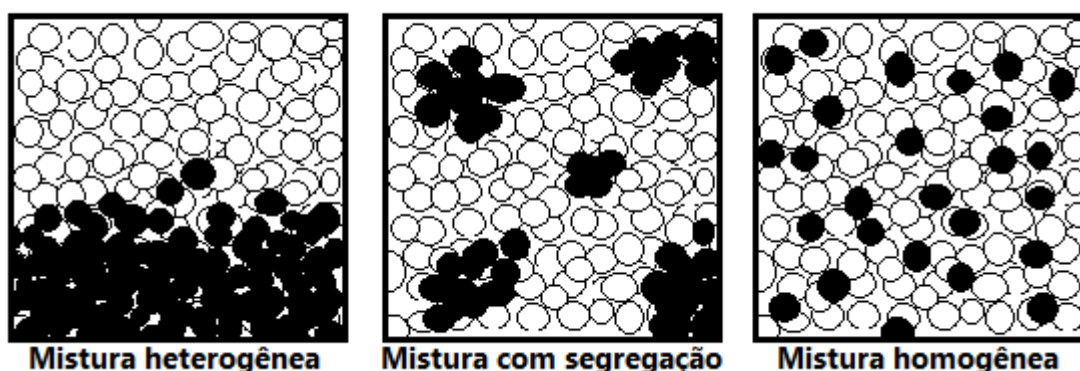


Figura 2.11 - Diferentes graus de homogeneização da mistura de pós

Fonte: Carvalho, 2009, adaptado pelo Autor

#### 2.4.4 Compactação

A compactação, segundo Lenel (1972), se dá pela inclusão de pressão nos pós, através de punções, no interior de matrizes cujas cavidades obedecem à forma e dimensões das peças finais e resulta no chamado compactado verde. O ferramental é geralmente composto por três componentes, são eles: matriz, punção superior e punção inferior. Um quarto componente, denominado macho, é empregado quando se necessita que a peça final tenha um furo.

De acordo com Iervolino (2009) o ciclo de compactação uniaxial depende de quatro movimentos básicos: enchimento, compactação, extração e remoção.

O enchimento é feito geralmente pelo escoamento da mistura que fica depositada num silo através de mangotes flexíveis até a chegada de sapatas de alimentação.

A etapa de compactação, em que o pó é prensado no formato desejado, é a etapa mais crítica de todo o processo de fabricação de uma peça. Uma compactação inadequada pode gerar peças com variações elevadas de densidade e conseqüentemente comprometer o

desempenho da peça obtida. Basicamente existem dois principais tipos de compactação a de simples ação e a de dupla ação. A compactação de simples ação é indicada para peças com altura muito baixa em relação a sua altura, exemplos seriam peças com proporções de uma arruela ou moeda. A utilização deste método em peças com maior altura relativa acarreta em efeito chamado de “deslocamento da linha neutra”. Na compactação de duplo efeito ambos punções realizam o movimento de compressão e o efeito obtido é a centralização da linha neutra.

A extração também denominada de ejeção completa o ciclo de compactação ao executar a retirada da peça de dentro do ferramental. A criticidade desta etapa é alta, uma vez que, se realizada de forma incorreta pode gerar trincas no material compactado. A extração pode ser feita a partir da elevação do punção inferior e em outros casos pela retração da matriz.

A remoção ocorre logo que a matriz é terminada e consiste em remover a peça verde do local de compactação antes que a sapata inicia o processo de enchimento de pó da cavidade. O processo de compactação pode ser visto na figura 2.12.

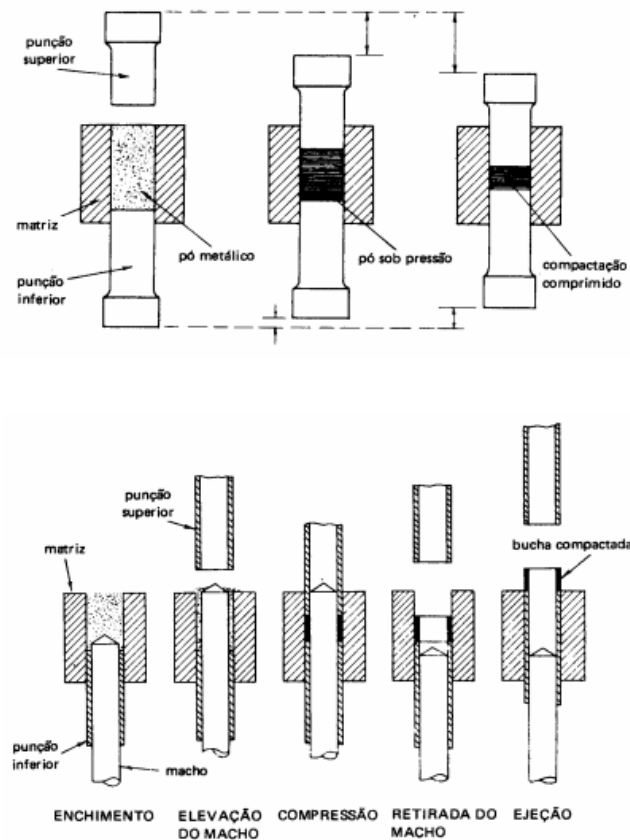


Figura 2.12 – Ciclo de Compactação  
Fonte: Iervolino, 2009, adaptado pelo Autor

### 2.4.5 Sinterização

A técnica da sinterização, trata-se de um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um aglomerado de partículas de um material específico, inicialmente em contato mútuo, ganhe resistência mecânica. A força motora do procedimento é o decréscimo da energia superficial livre do conjunto de partículas, obtido por meio da redução da superfície total do sistema. Como consequência dessa diminuição, alcança-se a supressão dos espaços vazios entre as partículas, o que resulta em um corpo rígido, com densidade completa ou parcial (Loberto, 2009).

Conforme Silva (1998), a sinterização é usada para o fabrico de peças metálicas, cerâmicas e compósitos metal cerâmica, sendo etapa integrante e fundamental de técnicas denominadas metalurgia do pó e cerâmica, que se incumbem justamente da fabricação de produtos metálicos e cerâmicos a partir dos pós dos constituintes. Esse aquecimento, denominado sinterização, normalmente confere propriedades físicas e mecânicas almejadas à massa de pó aglomerada.

O processo de sinterização é caracterizado pela consolidação por queima, na presença de oxigênio ou não, na qual as partículas do pó são unificadas, originando agregados com alta resistência mecânica. Em decorrência da queima, alcança-se a redução da porosidade e o aumento da densificação da peça. A sinterização ocorre em temperaturas entre  $\frac{1}{2}$  a  $\frac{2}{3}$  da temperatura de fusão, suficiente para causar o fluxo viscoso ou a difusão atômica. A redução da área superficial, e, por conseguinte da energia superficial, obtidas através da substituição de um pó solto (superfícies com elevada energia), por um sólido ligado (contornos de grão com energia mais baixa), são a força motriz da sinterização.

Silva 1998 ressalta que, existem dois tipos de sinterização, sendo elas a sinterização por fase sólida e a por fase líquida. Estes dois tipos básicos do procedimento são capazes de densificar parcial ou totalmente a estrutura. A sinterização por fase líquida propicia o fechamento total da porosidade, enquanto a via fase sólida viabiliza uma estrutura com porosidade controlada.

Na sinterização por fase sólida, o material é conduzido sem que haja qualquer líquido na estrutura. Das formas de transporte do material, podemos citar: fluxo viscoso (vidros, materiais amorfos e também cristalinos, submetidos à pressão); difusão atômica (cristais); e transporte de vapor (materiais com alta pressão de vapor). Em todos os casos citados, o

material é transferido para a região de contato entre as partículas próximas (KALPAKJIAN, 2000).

Outras formas de transporte, tais como o deslizamento e rotação de partículas inteiras (e não deslocamento de átomos individuais), são até mais eficientes dos que os métodos já citados. Contudo, independente dos mecanismos aplicados, rigidez e densificação são alcançadas pelo melhor empacotamento de matéria e pelo aumento da área de contato entre as partículas.

De acordo com Brito (2008), a formação de líquido na estrutura configura a sinterização por fase líquida. O líquido encontrado pode ser resultado da fusão de um dos componentes do sistema ou ainda da reação entre pelo menos, dois dos elementos integrantes. O líquido formado tem interferência decisiva no aspecto final da estrutura sinterizadas e na delimitação dos mecanismos usados no processo de sinterização. Diante disso, a sinterização por fase líquida é uma técnica bastante promissora na consolidação de materiais de complexa sinterização por fase sólida, e ainda para a aquisição de materiais compósitos.

De Almeida Braga (2007) afirmam que a transferência de massa durante a sinterização se dá conforme os mecanismos a seguir: resultado de um escoamento plástico ou viscoso; difusão atômica ao longo dos contornos dos grãos, em seu interior ou entre as partículas; evaporação de materiais voláteis nas superfícies convexas das partículas e a posterior condensação nas superfícies côncavas de outras partículas (devido as diferenças pressão-vapor e a energia superficial do sólido no líquido, que é maior na superfície convexas que nas côncavas). Logo, ocorre que a sinterização na fase líquida gera uma diminuição na energia superficial do material.

Kuczynski (1972), por meio da teoria da sinterização, comprova que, ao submeter o compactado verde a uma temperatura acima da metade da temperatura de fusão do composto, acontece a união entre as partículas metálicas, de modo que estas alcancem características físicas, químicas e mecânicas intrínsecas do material. A densificação é uma das características que ocorre por meio do transporte de massa, como pode ser ilustrado na figura 2.13.



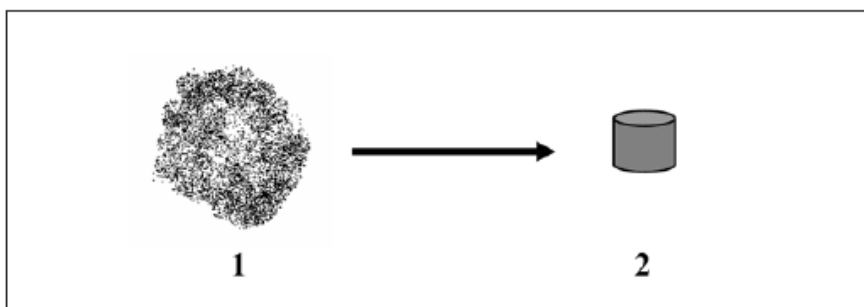


Figura 2.13 – Transformação de uma determinada quantidade de pó para sua correspondente quantidade densificada

Autor: Delforge, 2009

Delforge, (2009) alega que na sinterização a economia de material é extensiva, com perdas mínimas se comparadas a outros processos. Algumas das ligas são obtidas pela metalurgia do pó obtém custos muito inferiores aos alcançados na metalurgia convencional.

## 2.5 METALURGIA DO PÓ DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

A metalurgia do pó é comumente empregada na produção de compósitos porque, além de garantir uma melhor reprodutibilidade, se comparada ao metal líquido, o processo garante uma melhor homogeneidade na distribuição das partículas SiC, assegurando que não ocorra a formação de precipitados contínuos e aglomerados de SiC, que por sua vez reduzem a ductilidade do material compósito. Bacon (1989), Fujiwara (1986) E Hunt Jr. (1988), ressaltam ainda como vantagem, a maior quantidade de frações volumétricas de SiC que podem ser usadas, variando entre 5 e 70%, nos processos via metalurgia do pó. Contudo, ocorre uma redução marcante da ductilidade do compósito com teores acima de 25%.

No entanto, Bardal e Fredei (1990), alertam a existência de desvantagens no processo de metalurgia do pó para os compósitos, tais como os custos de produção dos pós, investimentos em prensas e matrizes, restrição da forma e menor produtividade, se comparado aos processos com metal líquido.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esse capítulo tem como objetivo descrever as técnicas e os métodos utilizados para o projeto em questão, para isso foram registradas as características técnicas e todas as variáveis envolvidas, tais como aparelhos, equipamentos e instrumentos utilizados nos passos fundamentais para a execução do presente trabalho.

O pó adquirido comercialmente para o referido projeto foi à liga AA6061 fabricado pela Alcoa (Mg), já o reforço de escória de alto-forno a carvão vegetal foi doação da empresa Gusa Nordeste. Os dois materiais, de granulometria irregular foram submetidos ao processo de peneiramento, com as peneiras de 20 a 270 mesh, sendo selecionado os materiais passantes na peneira de 150 e retidos na peneira de 200 mesh (entre 75 e 95 microns aproximadamente). A caracterização morfológica dos pós foi realizada com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) equipado com espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS). A verificação e determinação das composições dos materiais utilizados foi realizada através da técnica de fluorescência de raios-x

Após essa etapa, foram preparadas amostras do compósito com seis teores diferentes de escória, 5, 10, 15, 20, 25 e 30%. Isoladamente as amostras foram submetidas à mistura em moinho de bolas (moagem de alta energia) por 10 minutos, a fim de garantir uma total homogeneidade dos corpos de prova. Com o pó do compósito já homogeneizado, foi quantificado o material necessário para cada amostra que em seguida foi pesado e separado para a compactação. A compactação uniaxial em matriz metálica gerou discos de compactado verde que foram submetidos ao método geométrico de determinação de densidade. Em seguida, as amostras do compactado verde foram sinterizadas, e posteriormente ao resfriamento, tiveram suas densidades medidas e foram submetidas aos processos de lixamento (lixas de granas 220 a 1200) e polimento com pasta de diamante de 1 $\mu$ m.

As amostras sofreram ataque químico com ácido fluorídrico a 0,5%, a fim de revelar com mais intensidade as partículas de escória (aumentar o contraste entre as partículas e a matriz de liga de alumínio) e prepará-las para as etapas de análise metalográfica em microscopia eletrônica de varredura, com o intuito de verificar, juntamente com as medidas de densidade, a efetividade da sinterização e a distribuição das partículas na matriz metálica. Por fim, para verificar a influência da adição do reforço em diferentes teores nas propriedades do material, foram realizadas medições de dureza (pelo menos cinco medidas por amostra).

O fluxograma, figura 3.1, retrata o procedimento experimental utilizado no processamento, fabricação e caracterização do compósito pesquisado.

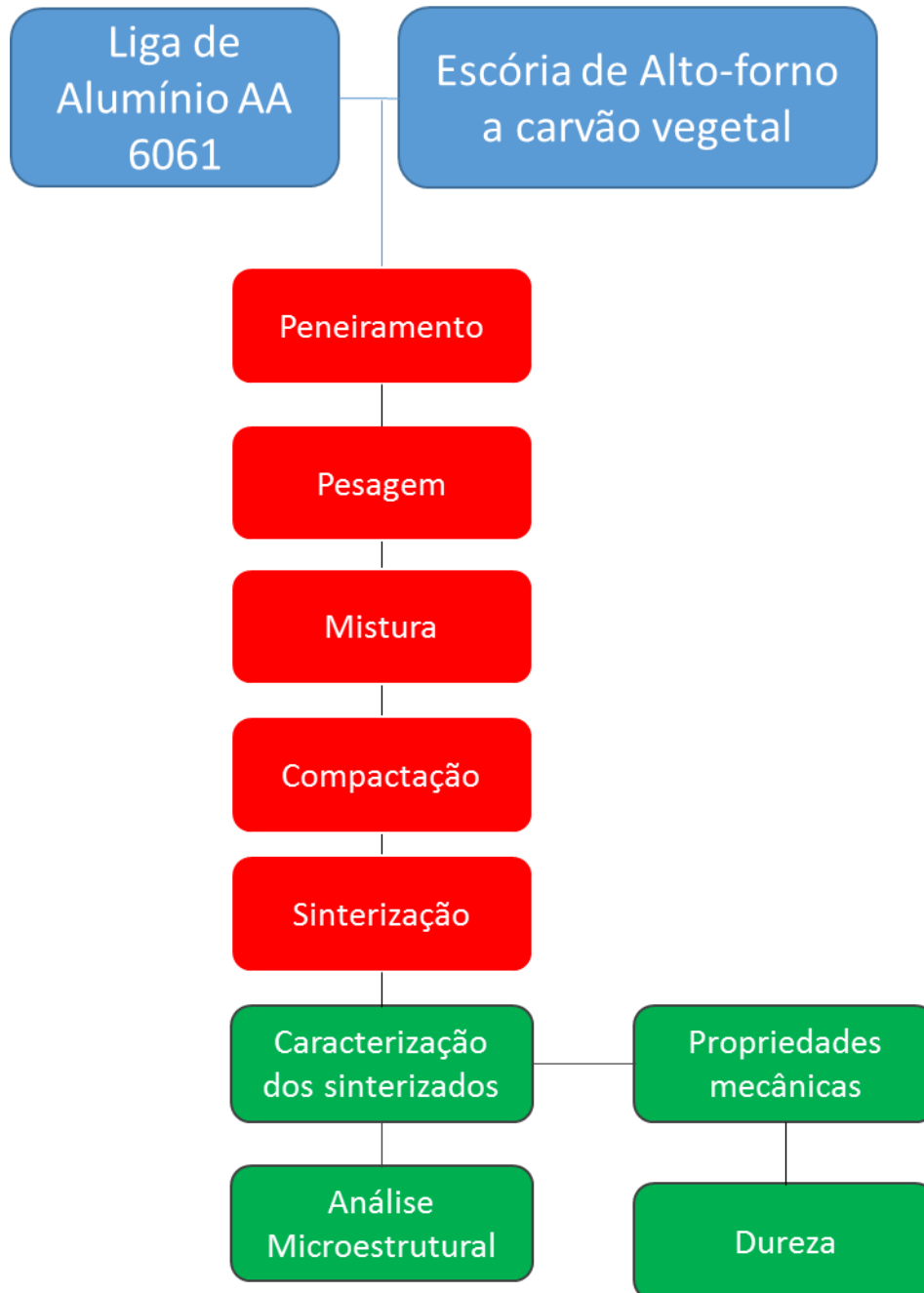


Figura 3.1 – Fluxograma de fabricação e caracterização do compósito elaborado

Fonte: Autor

### **3.1 MATERIAIS**

O pó de alumínio AA6061 adquirido possuía cerca de 97,5 % de pureza, além de óxidos presença de significativa de magnésio. A Liga 6061 é indicada para aplicações que demandam alta resistência à corrosão, além de possuir uma adequada usinabilidade, grau “C” segundo o sistema de classificação de usinabilidade da Aluminium Association, apresenta alta resistência e excelentes características de união. Os principais tratamentos térmicos que a liga de alumínio AA6061 é submetida são o T4 (solubilização e envelhecimento natural) e o T6 (solubilização e envelhecimento artificial) os dois aplicados para componentes que sofrem alívio de tensão por tração. As aplicações típicas dessa liga variam de acessórios e conectores elétricos a acoplamentos hidráulicos, miscelâneas, componentes de freios, corpos de válvulas, ou seja, de maneira geral é um material utilizado desde o âmbito comercial ao industrial e automotivo.

A escória de carvão vegetal utilizada neste presente trabalho possui abundante óxidos de Silício, Cálcio e Alumínio e teores intermediários de óxidos de Magnésio, Manganês, já os óxidos de Titânio e Enxofre são escassos, segundo o fornecedor Gusa Nordeste, além disso, a escória utilizada neste trabalho foi resfriada rapidamente o que conferiu elevada resistência mecânica e dureza, além gerar uma estrutura amorfa.

### **3.2 MÉTODOS**

Esta etapa tem por objetivo relatar de forma sequenciada as escolhas de procedimento adotadas realizando a caracterização dos elementos e dos processos acompanhando das justificativas na seleção dos parâmetros avaliados e as escolhas e aproximações que se mostraram necessárias.

#### **3.2.1 Peneiramento dos pós**

Para determinação da distribuição dos tamanhos de partículas dos pós da liga de alumínio e da escória conforme recebidos e a subsequente seleção da granulometria adequada à preparação dos compósitos foram realizados os peneiramentos sequenciais dos materiais isolados. Os peneiramentos foram realizados utilizando peneiras de 20, 48, 100, 150, 200 e 270 mesh em quantidades de 100g durante 3 minutos cada. A granulometria irregular foram submetidos ao processo de peneiramento, com as peneiras de 150 e 200 mesh, sendo selecionado materiais passantes na peneira entre 75 e 95  $\mu\text{m}$  aproximadamente.

### 3.2.2 Pesagem dos constituintes

Para este processo foi usado uma balança de precisão, marca Unibloc, modelo AUY220, com precisão de 03 (três) casas decimais pertencente ao Instituto Federal da Bahia, Unidade Salvador (IFBA). O procedimento foi realizado no Laboratório de Metalurgia do Instituto Federal da Bahia – Campus Salvador.

Inicialmente foi estimada a quantidade de materiais necessários para cada amostra e, a partir daí, foram realizadas as pesagens da matriz e do reforço para as proporções de 5, 10, 15, 20, 25, 30 % de escória. Além disso, por segurança, foi acrescentado 10,0 % de cada material. A figura 3.2 a seguir mostra a balança utilizada para a pesagem dos pós.



Figura 3.2 – Balança de precisão (UNIBLOC, modelo AUY220)

Fonte: Autor

A tabela 3.1 mostra as quantidades e proporções da liga de alumínio e escória por amostra e a quantidade utilizada de todas as 30 amostras preparadas para este projeto.

Tabela 3.1 – Distribuição de peso por amostra

<i>Quantidade do reforço</i>	<b>Total por amostra</b>		<b>Total para cinco amostras</b>	
	<i>Alumínio (g)</i>	<i>Escória (g)</i>	<i>Alumínio (g)</i>	<i>Escória (g)</i>
<b>5%</b>	11,4	0,6	57,0	3,0
<b>10%</b>	10,8	1,2	54,0	6,0
<b>15%</b>	10,2	1,8	51,0	9,0
<b>20%</b>	9,6	2,4	48,0	12,0
<b>25%</b>	9,0	3,0	45,0	15,0
<b>30%</b>	8,4	3,6	42,0	18,0
		<b>Total</b>	<b>297,0</b>	<b>63,0</b>

### 3.2.3 Procedimento de mistura

O procedimento utilizado para a mistura dos materiais foi o de agitação rotativa com o auxílio de um moinho atritor de alta energia. No entanto, este processo foi realizado com a ausência dos corpos moedores (esferas) apenas com o intuito de misturar e homogeneizar as amostras. O moinho utilizado foi do tipo moinho atritor horizontal de alta energia, como mostra figura 3.3 o tempo de mistura foi de 10 minutos e a rotação do moinho foi de 600 rpm.



Figura 3.3 – Moinho atritor horizontal

Fonte: Autor.

O procedimento foi realizado no Laboratório de Metalurgia do Instituto Federal da Bahia – Campus Salvador.

### 3.2.4 Procedimento de compactação

O processo de compactação utilizado foi o de compactação uniaxial em matriz metálica. A mistura dos pós já com a quantidade exata de 12g por amostra foi inserida no interior do molde que logo foi levado a prensa hidráulica, da marca Hidrumon e modelo PH200, para ser aplicada uma pressão de aproximadamente 500MPa. A figura 3.4 mostra o molde e a prensa que foram utilizadas neste processo.



Figura 3.4 – Molde e Prensa hidráulica (Hidrumon, modelo PH200)

Fonte: Autor.

O procedimento foi realizado no Laboratório de Metalurgia do Instituto Federal da Bahia – Campus Salvador.

### 3.2.5 Sinterização do Compactado Verde

A etapa de sinterização foi realizada logo após a compactação por ação simples dos pós. As pastilhas resultantes da compactação foram levadas a um forno tubular de atmosfera controlada com nitrogênio, para evitar oxidação.

Os parâmetros utilizados na sinterização foram: taxa de aquecimento de 10°C/min até atingir a temperatura de 550 °C, ou seja, 50 min para chegar a temperatura de permanência

das amostras, permanecendo nesta por 240 minutos. O resfriamento foi realizado dentro do próprio forno com simples desligamento e durou 120 minutos. A figura 3.5 mostra o forno em que foi executado há sinterização. O procedimento foi realizado no Laboratório Metalurgia do Instituto Federal da Bahia – Campus Salvador.



Figura 3.5 – Forno tubular

Fonte: Autor.

O gráfico do ciclo de sinterização, figura 3.6, exibe as variáveis envolvidas no processo de sinterização do compactado verde produzido com liga de Alumínio AA6061 reforçada com escória de carvão vegetal.



Figura 3.6 - Ciclo de Sinterização AA6061+ reforço de escória de carvão vegetal

Fonte: Autor.



### 3.3 CARACTERIZAÇÃO

#### 3.3.1 Medição da densidade das amostras antes e após a sinterização

Foi determinada a densidade das amostras antes e depois da sinterização, de forma que obteve-se uma relação entre a massa e o volume das amostras. Para isso fez-se necessário o uso da balança eletrônica Unibloc AUY220, com precisão de 03 (três) casas decimais, e paquímetro digital para determinação de medidas geométricas no Anexo I são mostradas as tabelas dos corpos de prova sinterizados com todas as variáveis obtidas neste processo.

#### 3.3.2 Procedimento metalográfico tradicional

As amostras devidamente sinterizadas foram submetidas aos processos de embutimento a frio, lixamento com lixas de granas 220, 400, 600 e 1200 e polimento com pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$ . O lixamento e o polimento foram realizados numa politriz rotativa Arotec Aropol W. Entre cada etapa de lixamento e antes do polimento as amostras eram lavadas e água corrente abundante e álcool para limpeza da superfície. A figura 3.7 mostra as lixas e máquina politriz que foram utilizadas.



Figura 3.7 – Lixas e Politriz

Fonte: Autor

### 3.3.3 Caracterização por Fluorescência de Raios-X

A espectrometria de fluorescência de raios-X é uma técnica não destrutiva que possibilita identificar os elementos químicos presentes em uma amostra (análise qualitativa), bem como identificar a proporção em que cada elemento se encontra presente na amostra.

Este processo se dá por uma fonte de radiação de elevada energia, radiação gama ou radiação X, que provoca a excitação dos átomos da substância que pretende-se analisar. Quando um átomo no estado fundamental fica sob a ação de uma fonte externa de energia, ele absorve esta energia, promovendo elétrons a níveis mais energéticos, assim neste estado o átomo apresenta uma situação instável, denominada “Estado Excitado”. Partindo do princípio que na natureza as partículas tende a buscar o estado de estabilidade, o átomo excitado tende espontaneamente a retornar ao seu estado fundamental, para tanto o mesmo emite energia. Esta energia envolvida na absorção é uma característica específica de cada elemento químico o que permite sua identificação e correspondente quantificação (BECKHOFF, 2006). A figura 3.8 apresenta o espectrômetro empregado na técnica de fluorescência de raios-x.



Figura 3.8 - Espectrômetro por energia dispersiva de raio-X, Oxford Instruments 51-ADD0007

Fonte: Autor.

### 3.3.4 Microscopia

Nestas análises foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca TESCAN VEGA 3 SEM LMU apresentado na figura 3.9.

A microscopia eletrônica de varredura possibilita avaliar a homogeneidade, presença ou não de porosidade e morfologia das partículas e fases dos constituintes dos compósitos. Quando aliada a espectroscopia a dispersão de energia por raios-x, também é possível avaliar a composição pontual do material analisado.



Figura 3.9 – Microscópio Eletrônico de Varredura  
Fonte: Autor.

### 3.3.5 Dureza Rockwell H

Segundo Souza (2009), a dureza da superfície pode ser definida como sendo a resistência oferecida pelos sólidos à penetração de uma ponta, ela é uma propriedade mecânica que indica de forma indireta a resistência do material à abrasão, desgaste e também a capacidade do material de resistir a esforços.

Os ensaios mais frequentemente utilizados na determinação da dureza são: Brinell, Rockwell e Vickers. O ensaio selecionado neste trabalho foi o Rockwell H, pois este ensaio possui entre outras vantagens a possibilidade de avaliar a dureza de metais diversos, desde os mais moles até os mais duros, sendo rápido e fácil de executar.

Dentre as escalas possíveis para o ensaio Rockwell foi selecionado a escala H, pois é aquela indicada para ligas de alumínio de acordo com a norma ABNT NBR NM ISO 6508-

1:2008 e que apresentou os resultados mais coerente, a tabela 3.2 apresenta a faixa de utilização e os materiais indicados para as diferentes escalas Rockwell.

Tabela 3.2 - Escala de dureza Rockwell normal e aplicações.

Escala	Cor da escala	Carga maior	Penetrador	Campo de aplicação
A	Preta	60	Diamante cone 120°	Carbonetos, folhas de aço com fina camada superficial endurecida.
C	Preta	150	Diamante cone 120°	Aço, titânio, aços com camada endurecida profunda, materiais com HRB>100.
D	Preta	100	Diamante cone 120°	Chapas finas de aço com media camada endurecida.
B	Vermelha	100	Esfera aço 1,5875 mm	Ligas de cobre, aços brandos, alumínio, ferro maleável.
E	Vermelha	100	Esfera aço 3,175 mm	Ferro fundido, ligas de alumínio e de magnésio.
F	Vermelha	60	Esfera aço 1,5875 mm	Ligas de cobre recozidas, folhas finas de metais moles.
G	Vermelha	150	Esfera aço 1,5875 mm	Ferro maleável, ligas de cobre-níquel-zinco e de cobre-níquel.
H	Vermelha	60	Esfera aço 3,175 mm	Alumínio, zinco, chumbo.
K	Vermelha	150	Esfera aço 3,175 mm	Metais de mancais e outros muito moles ou finos

Fonte: ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008 (adaptado pelo Autor)

O ensaio de dureza Rockwell baseia-se na medição da profundidade produzida por um penetrador (cônico ou esférico), subtraídas à recuperação elástica devida a retirada de uma carga maior e a profundidade causada pela aplicação de uma carga menor. A norma que baliza os parâmetros do ensaio é a ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008. O procedimento do ensaio de dureza Rockwell H pode ser resumido em 4 etapas, descritas a seguir:

- Aproximar a superfície do corpo de prova no penetrador;
- Aplicar no corpo de prova uma pré-carga (10kgf);
- Aplicar a carga maior (60, 100 ou 150kgf) até o ponteiro parar;
- Retirar a carga maior e fazer a leitura do valor indicado no mostrador a partir da escala apropriada.

Assim a análise de dureza foi realizada nas amostras sinterizadas utilizando o Durômetro Mitutoyo modelo Durotwin – D Plus apresentado na figura 3.10, onde a metodologia utilizada está preconizada na norma ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008. A pré-carga aplicada no ensaio foi de 10 kgf e a carga de 60kgf o tempo de aplicação da carga variou de 10 a 15 segundos como indicado pela norma, utilizando para tal um penetrador esférico de aço com 3,175mm de diâmetro.



Figura 3.11 – Durômetro Mitutoyo

Fonte: Autor.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas etapas descritas no procedimento experimental por meio de gráficos, tabelas e imagens. Além disso, são analisados os resultados de forma a obter um entendimento claro e objetivo dos resultados obtidos usando para isso toda a base teórica apresentada no segundo capítulo.

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) foi empregada para caracterização microestrutura e para determinação da composição química qualitativa do pó e das amostras após o processo de sinterização.

Uma análise do desempenho mecânico do compósito foi feita a partir da avaliação da dureza por meio de ensaios de Dureza Rockwell H, juntamente com uma análise da densidade das amostras com o aumento da adição do reforço de escória de carvão vegetal, empregando para isso o método geométrico utilizando a relação massa / volume e balança analítica de precisão.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMO RECEBIDOS

Os materiais utilizados para a obtenção do compósito de liga de alumínio AA 6061 e escória de alto forno a carvão vegetal foram fornecidos na forma de pó. Inicialmente foram realizadas as caracterizações química e estrutural e, em seguida, o peneiramento para determinação da distribuição de tamanhos de partículas.

A composição química da liga de alumínio AA6061 de acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) deve apresentar os limites teóricos mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química da liga de alumínio AA6061

Liga	Composição (%)					
	Si	Cu	Mn	Zn	Outros	Al
AA 6061	0,4-0,8	0,15-0,40	0,01-0,15	0,01-0,25	Até 2,50	Restante

Através do processo de fluorescência por raios-x foram determinadas as composições dos pós para conferir se estavam de acordo com a ABAL, no caso do alumínio, e de acordo com a Gusa Nordeste, no caso da escória. A tabela 4.2 traz as porcentagens em massa dos componentes do pó de alumínio e a Tabela 4.3 traz as porcentagens em massa dos componentes do pó da escória:

Tabela 4.2 – Composição química do pó de alumínio

<b>Composição química do pó de Alumínio</b>	
<i>Composição</i>	<i>Teor em Porcentagem</i>
<i>Si</i>	0,7
<i>Mg</i>	1,1
<i>Al</i>	98,2

Tabela 4.3 – Composição química da Escória

<b>Composição química da Escória</b>	
<i>Composição</i>	<i>Teor em Porcentagem</i>
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	0,856
<i>MgO</i>	8,11
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	10,2
<i>SiO<sub>2</sub></i>	33,1
<i>SO<sub>3</sub></i>	2,07
<i>K<sub>2</sub>O</i>	0,885
<i>CaO</i>	42,2
<i>TiO<sub>2</sub></i>	0,723
<i>MnO</i>	0,686
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0,789
<i>SrO</i>	0,108
<i>BaO</i>	0,134

Observando-se a tabela 4.2, fica evidenciado que a composição da liga de alumínio AA6061 apresentou os valores dentro do padrão estabelecido pela ABAL, e, na Tabela 4.3,

viu-se que a composição apresentada pela escória era próxima da esperada (medida pelo laboratório da Gusa Nordeste), de modo que somente a porcentagem em massa de cada composto demonstrou irrisória alteração.

O difratograma apresentado na figura 4.1 mostra que a escória de alto forno resfriada em água apresentou uma estrutura amorfa, devido ao seu resfriamento brusco. Quanto maior a taxa de resfriamento maior será o grau de vitrificação da escória, podendo este alcançar valores superiores a 95%. De acordo com Cincotto et al (1992), o acidente sobre a curva por volta de  $2\theta$  igual a  $32^\circ$  corresponde à fase  $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$  e os outros por volta de  $37^\circ$  e  $43^\circ$  correspondem à fase  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ , compostos estes formados a partir da reação do óxido de silício com o óxido de cálcio, que estão presentes em maior quantidade na escória como pode ser verificado pelo resultado da fluorescência de raios x mostrado na tabela 4.3.

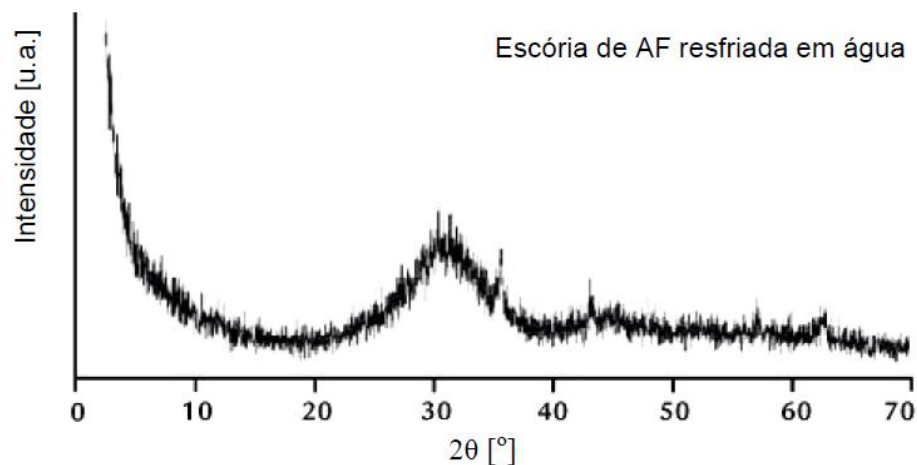


Figura 4.1 – Difratograma de raios X da escória de Alto Forno a carvão vegetal resfriada em água

Fonte: Cortesia Empresa Gusa Nordeste, 2015.

Os resultados do peneiramento sequencial para a determinação da distribuição do tamanho de partículas para a liga de alumínio e para a escória podem ser observados nos gráficos das figuras 4.2 e 4.3. É possível observar que a distribuição de tamanhos de partículas para a liga de alumínio indica que a maior parte destas possuem diâmetro inferior a  $74\ \mu\text{m}$  (cerca de 78%), com grande parte destas com diâmetro inferior a  $53\ \mu\text{m}$ . Para a escória, a maior parte das partículas se encontram com o diâmetro entre  $149$  e  $53\ \mu\text{m}$  (cerca de 80%), com apenas uma pequena quantidade com diâmetro inferior a  $53\ \mu\text{m}$ . O pó da liga de alumínio foi produzido por atomização à água e o pó da escória através de moagem de alta energia.



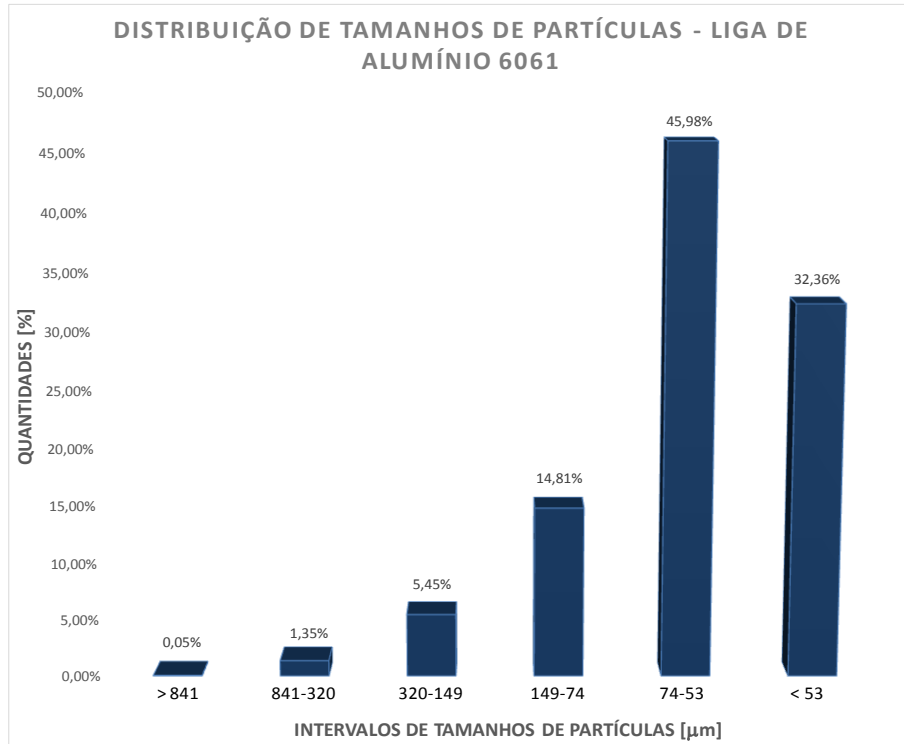


Figura 4.2 – Gráfico da distribuição dos tamanhos de partícula para o pó da liga de alumínio AA 6061 determinada por peneiramento sequencial.

Fonte: Autor

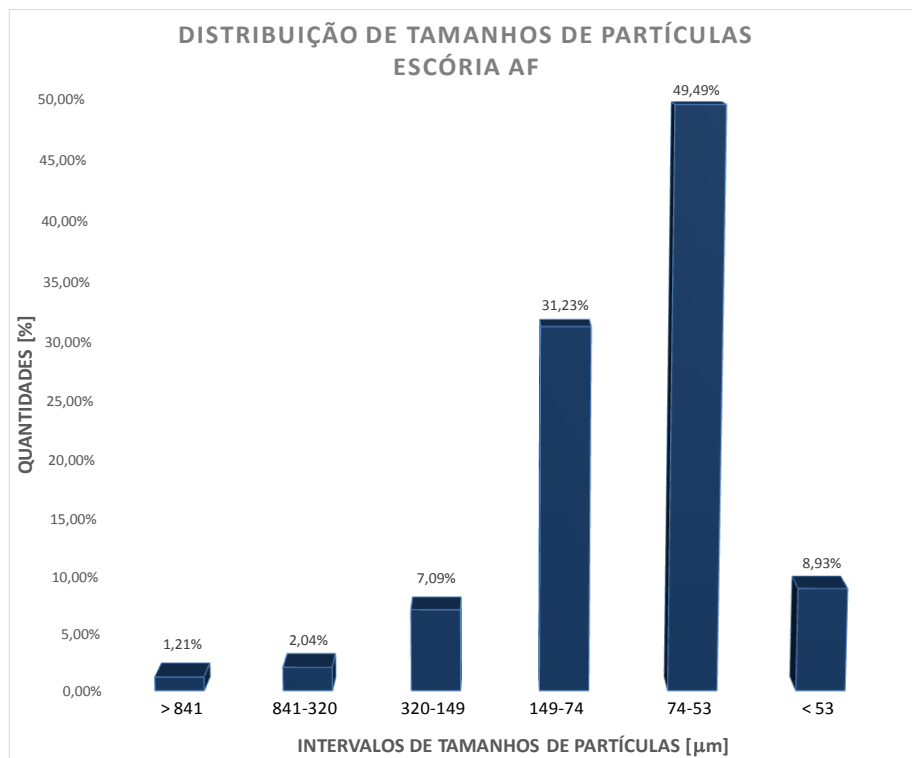


Figura 4.3 – Gráfico da distribuição dos tamanhos de partícula para o pó da escória de alto forno a carvão vegetal determinada por peneiramento sequencial.

Fonte: Autor

## 4.2 DENSIDADES DOS COMPÓSITOS

Com o intuito de se avaliar a efetividade dos processos de compactação e sinterização utilizados, medidas de densidade pelo método geométrico foram realizadas nos compactados a verde e nas amostras sinterizadas. Os resultados das medições podem ser vistos na tabela 4.4

Tabela 4.4 – Densidade e medidas geométricas das amostras sinterizadas

Fração do reforço	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )											
	5%		10%		15%		20%		25%		30%	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
<b>Média</b>	2477,35	2510,42	2453,46	2550,27	2420,34	2533,06	2405,78	2698,45	2338,64	2401,28	2383,84	2396,92
<b>Desvio</b>	23,39	22,07	20,86	27,25	25,14	77,99	82,55	65,13	118,27	81,10	54,31	60,74
<b>Porosidade %</b>	8,25	7,02	9,13	5,55	10,36	6,18	10,90	0,06	13,38	11,06	11,71	11,23

Fonte: Autor.

Os resultados das medidas de densidade indicam que para as amostras com adição de 5 a 20% de escória, e também para a liga de alumínio sem adição, a sinterização se mostrou eficiente, apresentando valores superiores a 93% quando comparados com a densidade da liga de alumínio 100% consolidada (obtida por fusão). No entanto, para as amostras com 25 e 30% de adição de escória, esta grandeza apresentou uma sensível redução, contudo, ainda se mantendo acima dos 85%. A porosidade foi calculada pela razão entre a densidade das amostras dos compósitos e a densidade teórica do alumínio obtido por fundição, uma vez que nessas condições pode se considerar 100% densificação. Tal resultado sugere que, de alguma forma, teores acima de 20 de escória afetam de forma negativa a sinterização da liga de alumínio, dificultando a difusão atômica da liga e a migração dos contornos (GERMAN, 1984).

Para um melhor entendimento quanto as variações referentes à densidade, foi calculada a densidade relativa dos corpos de prova antes e depois da sinterização. Calcula-se a densidade relativa através da seguinte expressão:

$$\rho_r = \frac{\rho_{real}}{\rho_t} \times 100$$

Onde:

$\rho_r$  = Densidade relativa

$\rho_{real}$  = Densidade real do sinterizado

$\rho_t$  = Densidade teórica

### 4.3 DUREZA DOS COMPÓSITOS DE ALUMÍNIO REFORÇADOS COM CARVÃO VEGETAL

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a influência da incorporação das diferentes frações em peso de escória de carvão vegetal na dureza da liga de Alumínio AA6061.

Para tanto os compósitos de alumínio AA6061 reforçados com escória de carvão vegetal obtidos pelo processo de metalurgia do pó foram submetidos ao ensaio de Dureza Rockwell H. Os resultados obtidos no ensaio estão apresentados na tabela 4.5 para a liga de alumínio AA6061 sinterizada e nas tabelas 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, para os compósitos com teores de escória de 5, 10, 15, 20, 25 e 30%.

Tabela 4.5 – Dureza Rockwell H para amostra de liga de alumínio AA6061.

AI	Medidas	Dureza		
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
	1	51,40	46,10	30,40
	2	46,10	43,00	36,70
	3	48,90	54,10	50,20
	4	39,70	46,20	46,10
	5	50,00	40,20	47,60
	<b>Media</b>	<b>47,22</b>	<b>45,92</b>	<b>42,20</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>4,14</b>	<b>4,65</b>	<b>7,45</b>
<b>Dureza média entre as amostras</b>				<b>45,11</b>
<b>Desvio Padrão entre as amostras</b>				<b>2,13</b>

Fonte: Autor.

Tabela 4.6 – Dureza Rockwell H amostra com 5% de escória de carvão vegetal.

5% de Escória	Medidas	Dureza		
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
	1	59,20	41,50	32,50
	2	68,30	47,60	60,50
	3	67,40	55,20	57,80
	4	67,30	60,50	60,90
	5	70,50	49,80	59,70
	6	70,80	65,60	
	<b>Média</b>	<b>67,25</b>	<b>53,37</b>	<b>54,28</b>
	<b>Desvio</b>	<b>3,85</b>	<b>8,07</b>	<b>10,94</b>

	<b>Padrão</b>		
<b>Dureza média entre as amostras</b>			<b>58,30</b>
<b>Desvio Padrão entre as amostras</b>			<b>6,34</b>

Fonte: Autor.

Tabela 4.7 – Dureza Rockwell H para amostra com 10% de escória de carvão vegetal.

10% de Escória	Medidas	Dureza		
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
	1	54,90	31,80	70,30
	2	66,30	45,20	72,10
	3	68,60	57,40	70,50
	4	75,00	51,80	73,10
	5	65,80	72,50	74,40
	6	72,00	72,70	70,50
	<b>Média</b>	<b>67,10</b>	<b>55,23</b>	<b>71,82</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>6,32</b>	<b>14,55</b>	<b>1,54</b>
<b>Dureza média entre as amostras</b>			<b>64,72</b>	
<b>Desvio Padrão entre as amostras</b>			<b>6,98</b>	

Fonte: Autor.

Tabela 4.8 – Dureza Rockwell H para amostra com 15% de escória de carvão vegetal.

15% de Escória	Medidas	Dureza		
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
	1	73,00	68,60	55,30
	2	73,50	69,50	68,90
	3	69,90	71,20	67,30
	4	68,60	69,40	73,90
	5	68,00	59,10	73,70
	6	76,30	66,10	68,40
	<b>Média</b>	<b>71,55</b>	<b>67,32</b>	<b>67,92</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>2,96</b>	<b>3,98</b>	<b>6,19</b>
<b>Dureza média entre as amostras</b>			<b>68,93</b>	
<b>Desvio Padrão entre as amostras</b>			<b>1,87</b>	

Fonte: Autor.

Tabela 4.9 – Dureza Rockwell H para amostra com 20% de escória de carvão vegetal.

20% de Escória	Medidas	Dureza		
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
	1	67,60	54,20	81,40
	2	73,20	68,70	77,40
	3	69,30	76,70	86,40

	4	72,90	69,40	82,30
	5	58,90	76,30	84,00
	6	63,50	66,40	
	<b>Media</b>	<b>67,57</b>	<b>68,62</b>	<b>82,30</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>5,08</b>	<b>7,50</b>	<b>2,98</b>
<b>Dureza média entre as amostras</b>				<b>72,83</b>
<b>Desvio Padrão entre as amostras</b>				<b>6,71</b>

Fonte: Autor.

Tabela 4.10 – Dureza Rockwell H para amostra com 25% de escória de carvão vegetal.

25% de Escória	Medidas	Dureza		
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
	1	76,50	56,70	77,20
	2	80,00	55,80	72,50
	3	84,30	70,40	62,00
	4	62,60	68,80	78,40
	5	79,30	80,10	42,40
	6		77,80	75,20
	<b>Media</b>	<b>76,54</b>	<b>68,27</b>	<b>67,95</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>7,40</b>	<b>9,35</b>	<b>12,62</b>
<b>Dureza média entre as amostras</b>				<b>70,92</b>
<b>Desvio Padrão entre as amostras</b>				<b>3,98</b>

Fonte: Autor.

Tabela 4.11 – Dureza Rockwell H para amostra com 30% de escória de carvão vegetal.

30% de Escória	Medidas	Dureza		
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
	1	64,90	36,40	63,00
	2	69,10	46,00	75,90
	3	71,70	40,50	68,30
	4	71,50	47,10	70,30
	5	69,80	50,60	73,10
	6	72,80	52,30	
	<b>Media</b>	<b>69,97</b>	<b>45,48</b>	<b>70,12</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>2,58</b>	<b>5,52</b>	<b>4,39</b>
<b>Dureza média entre as amostras</b>				<b>61,86</b>
<b>Desvio Padrão entre as amostras</b>				<b>11,58</b>

Fonte: Autor.

A metodologia utilizada está preconizada na norma ASTM E 18-11 (2008). As medidas realizadas foram feitas com um penetrador esférico de aço de 3,175 mm, a pré-carga

aplicada no ensaio foi de 10 kgf e a carga de 60kgf o tempo de aplicação da carga variou de 10 a 15 segundos como indicado pela norma.

Foi levantado um gráfico, figura 4.4, da dureza média das amostras por percentual de escória para avaliar o desempenho dessa propriedade em função do percentual de escória adicionado ao compósito em relação a dureza apresentada pela liga de alumínio AA6061 sinterizada.

Segundo Callister (2008), o comportamento mecânico dos metais, no que diz respeito ao aumento da resistência está relacionado com o movimento das discordâncias, uma vez que a deformação plástica macroscópica corresponde ao movimento de grandes números de discordâncias. Dessa forma, a habilidade de um metal para se deformar plasticamente depende da capacidade das discordâncias para se moverem. Assim, as propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade e tensão de escoamento, estão relacionadas com a capacidade com que a deformação plástica pode ser induzida mediante a redução da mobilidade das discordâncias, ou seja, as propriedades mecânicas são aumentadas quanto mais difícil for a habilidade de movimentação das discordâncias. No que diz respeito em especial à dureza, está também pode ser relacionada com a distribuição e tamanho das fases endurecedoras (partículas ou precipitados), uma vez que é afetada localmente (medida pontual), principalmente quando as partículas são maiores que 1  $\mu\text{m}$ .

Inicialmente tomando como ponto de partida a dureza da liga de AA6061 sinterizada sem reforço que foi de 45,11 HRH, observa-se que o compósito reforçado com 20% de escória apresentou o maior valor absoluto de dureza (72,83 HRH) o que proporciona um ganho de 61,45% desta importante propriedade mecânica. Já para os valores de 25 e 30% de escória houve uma queda na dureza e tais resultados indicam que teores de escórias superiores a 20% passam a dificultar o processo de sinterização da liga de alumínio muito provavelmente pelo fato de interferirem negativamente na difusão atômica e na migração dos contornos. Pressupõe-se, portanto, necessários tempos ou temperaturas mais elevadas para sinterização (GERMAN, 1984).

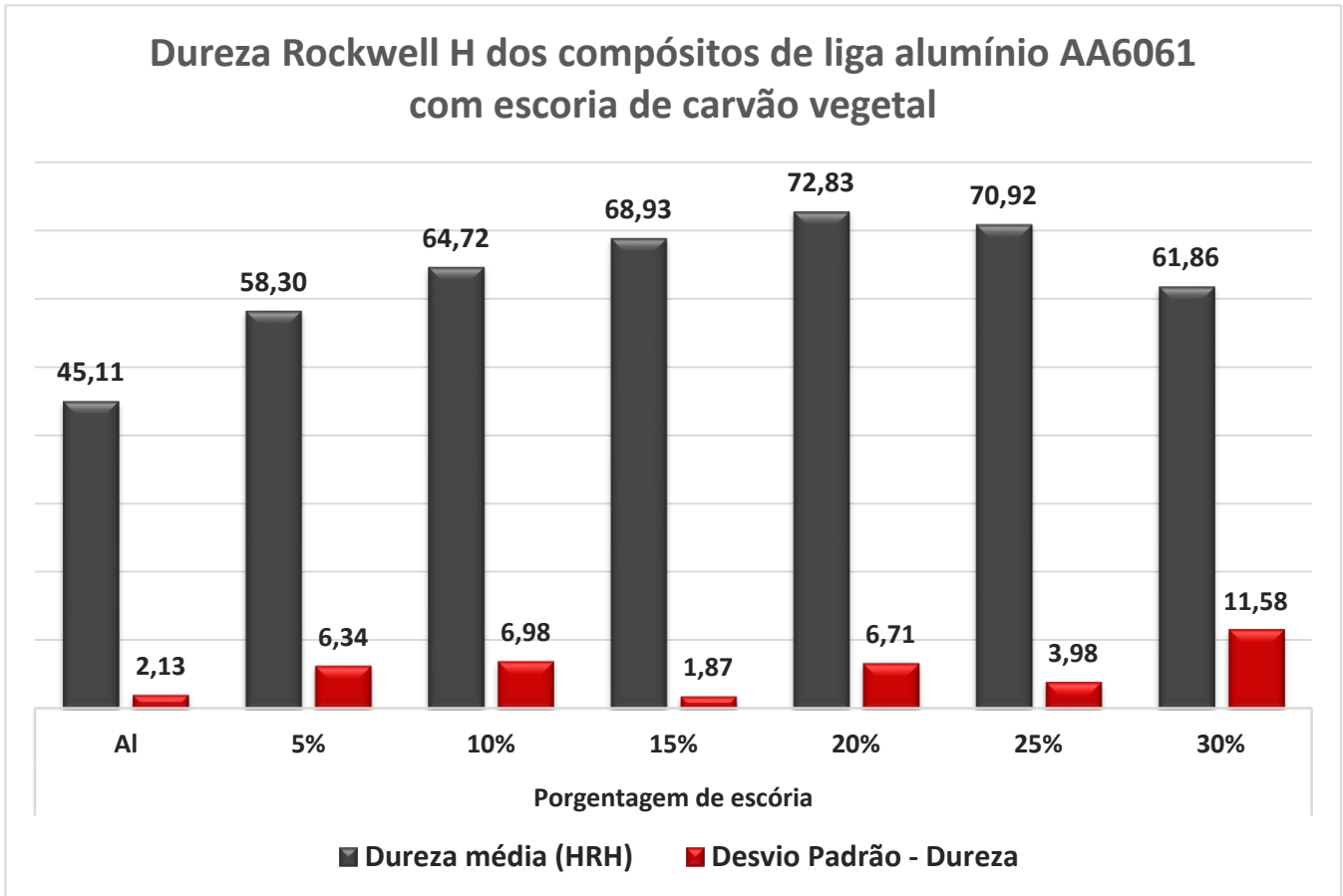


Figura 4.4 - Gráfico de Dureza Rockwell H realizada do compósito da liga de alumínio AA6061 reforçada com escória de carvão vegetal e percentual do aumento de densidade das amostras

Fonte: Autor

Os valores medidos nos materiais revelam um aumento na dureza com aumento percentual de escória no compósito, uma vez que a carga necessária para gerar a mesma impressão é maior, isso reforça a ideia de que as partículas de escória de carvão vegetal aumentam a dureza do material por aumentarem o campo de tensões no entorno das partículas as quais são mais duras (partículas cerâmicas) que a matriz. Apesar de pontual, as medidas de dureza para as amostras utilizadas apresentaram uma dispersão relativamente baixa.

#### 4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As análises em microscopia eletrônica de varredura indicaram que havia uma diferença no que diz respeito à morfologia dos pós dos materiais utilizados. A liga AA6061 apresentou uma distribuição de tamanho de partículas bem mais uniforme que o pó da escória de alto forno a carvão vegetal (figura 4.5). Tal resultado era esperado e pode ser justificado pelo fato do pó da liga de alumínio ser produzido por atomização a gás e o pó da escória por moagem de pelotas irregulares e heterogêneas.

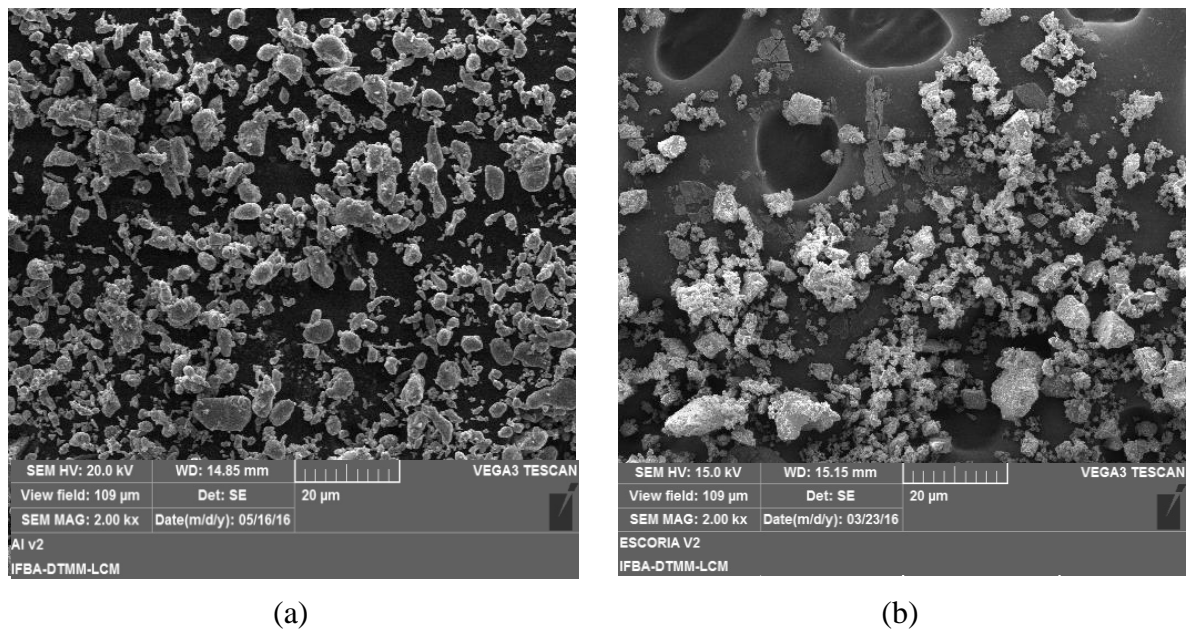


Figura 4.5 – Imagens de MEV dos pós conforme recebidos (a) da liga alumínio AA6061 e (b) da escória de alto forno a carvão vegetal

Fonte: Autor

No que diz respeito aos materiais sinterizados (liga de alumínio e composto), é possível observar, principalmente para a liga de alumínio sem adição de escória (figuras 4.6(a) e 4.6(b) que a sinterização foi razoavelmente eficiente, (ocorreu a consolidação e densificação do material), no entanto apresentou uma pequena quantidade porosidade residual. A ocorrência desta porosidade pode ser justificada pela presença de oxigênio no material (resultados de EDS – figuras 4.6(c) e 4.6(d), o que indica que o mesmo oxidou ainda que parcialmente dificultado o processo de sinterização.



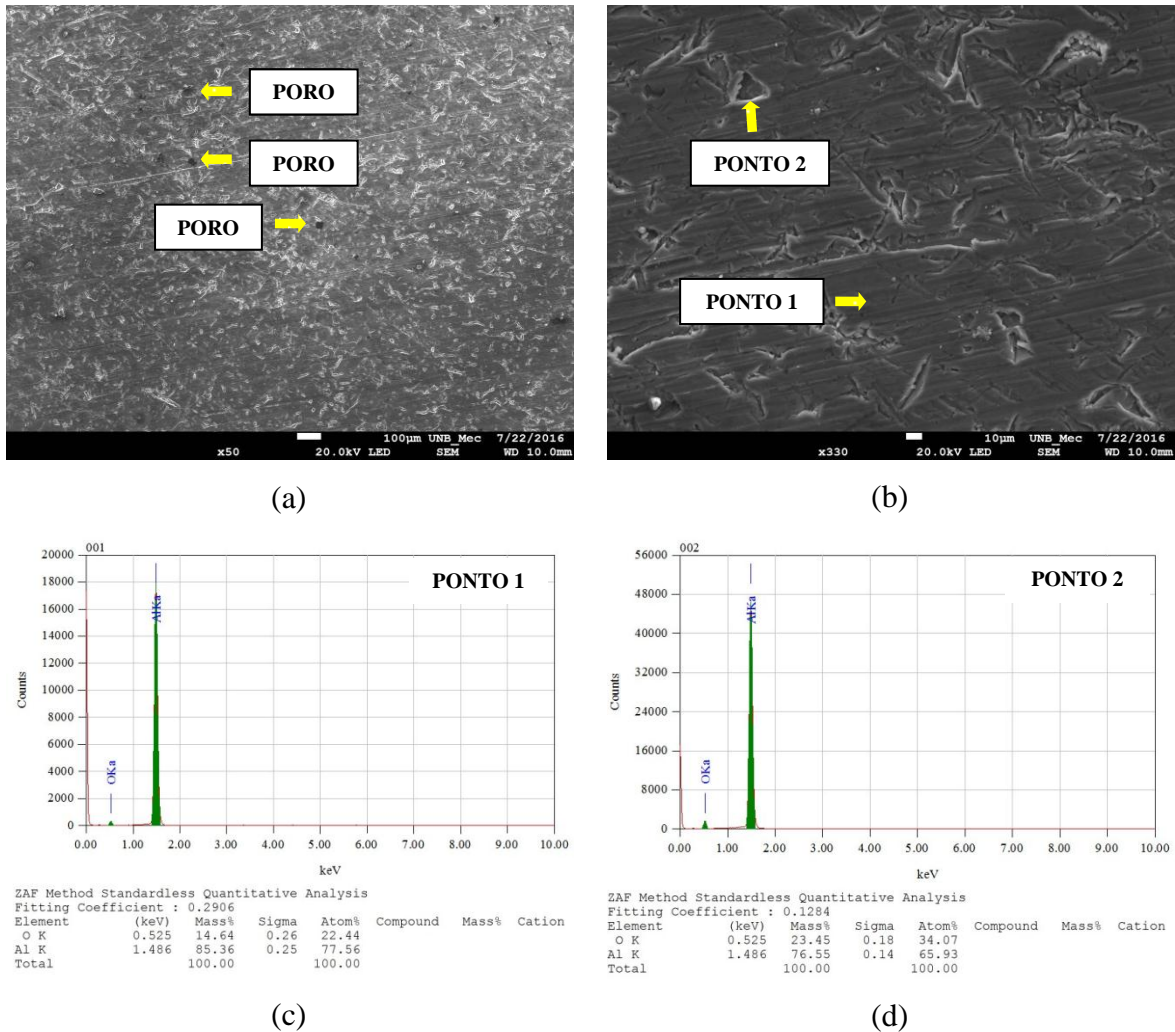
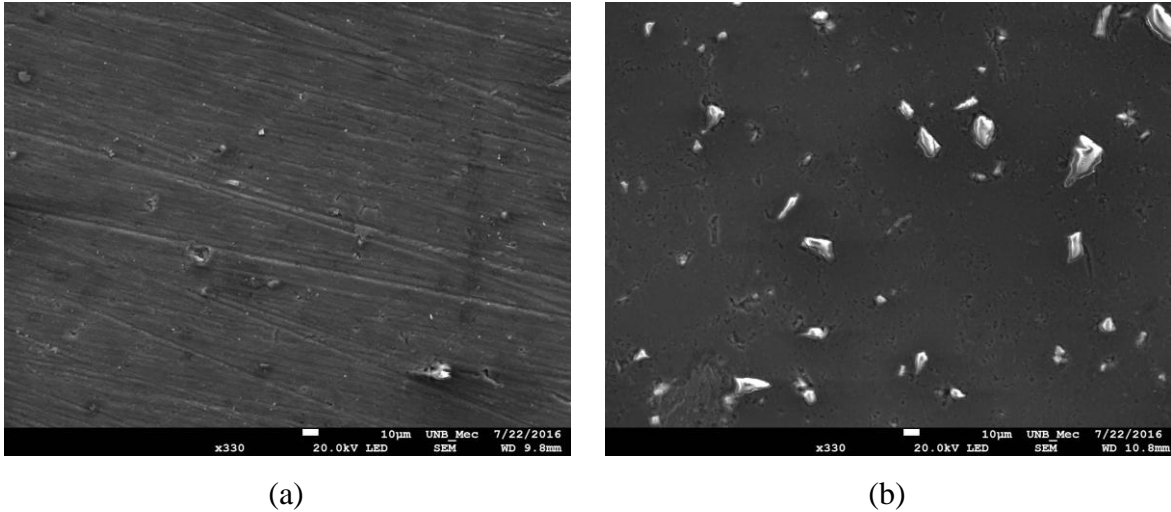


Figura 4.6 – Imagens de MEV e resultados de EDS da liga alumínio AA6061 sinterizada.

Fonte: Autor

Para o compósito, também é possível observar uma distribuição relativamente uniforme dos particulados de escória na matriz da liga de alumínio, assim como, locais de onde foram arrancadas partículas durante a operação lixamento ou polimento provocando o surgimento de marcas lineares (semelhantes a arranhões), conforme podem ser vistos nas figuras 4.7(a) e 4.7(b) para o compósito com 5 e 10% de escória respectivamente. Mesmo tendo passado pelo processo de peneiramento, também é possível observar nestas mesmas figuras uma certa dispersão no tamanho de algumas partículas de reforço, as quais chegavam a medir de 3 a 20  $\mu\text{m}$ .



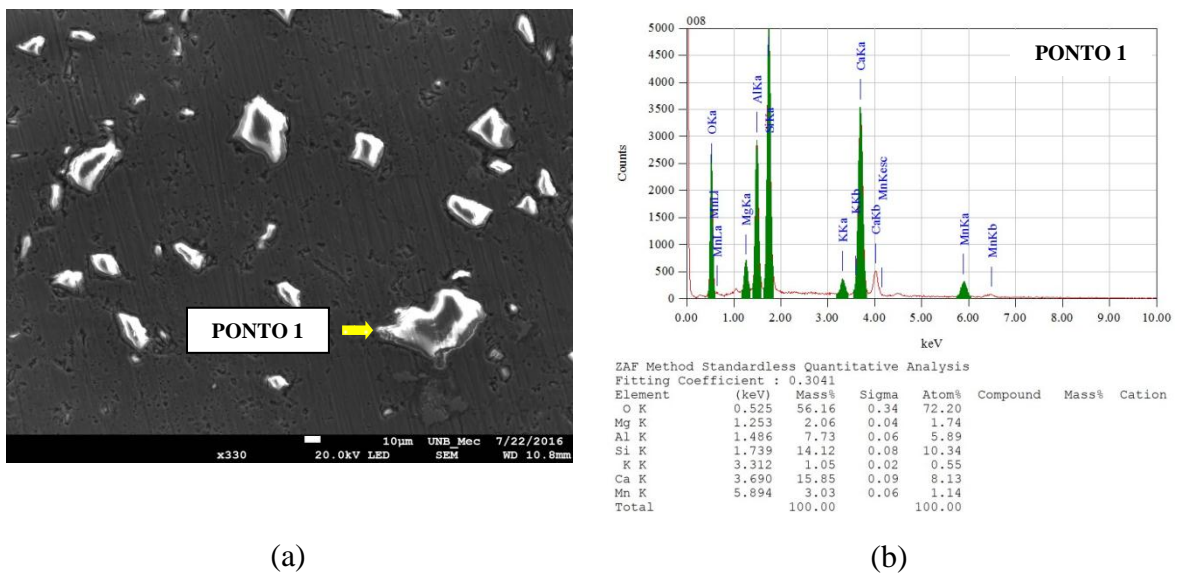
(a)

(b)

Figura 4.7 – Imagens de MEV do compósito sinterizado de liga alumínio AA6061 reforçado com partículas de escória de alto forno a carvão vegetal nas concentrações de (a) 5% e (b) 10%.

Fonte: Autor

Para o compósito com 15 e 20% de adição de escória é possível verificar o aumento da concentração de partículas quando comparadas com o compósito com 5 e 10% de escória (figuras 4.8(a) e 4.9(a)).



(a)

(b)

Figura 4.8 – Imagens de MEV e resultado de EDS do compósito sinterizado de liga alumínio AA6061 reforçado com partículas de escória de alto forno a carvão vegetal na concentração de (a) 15%.

Fonte: Autor

Acompanhando o resultado da fluorescência de raios x, os resultados do EDS para as partículas (figuras 4.8(b) e 4.9(b)) indicam a presença de vários óxidos presentes na escória, tais como os óxidos de silício e cálcio que aparecem em maior quantidade.

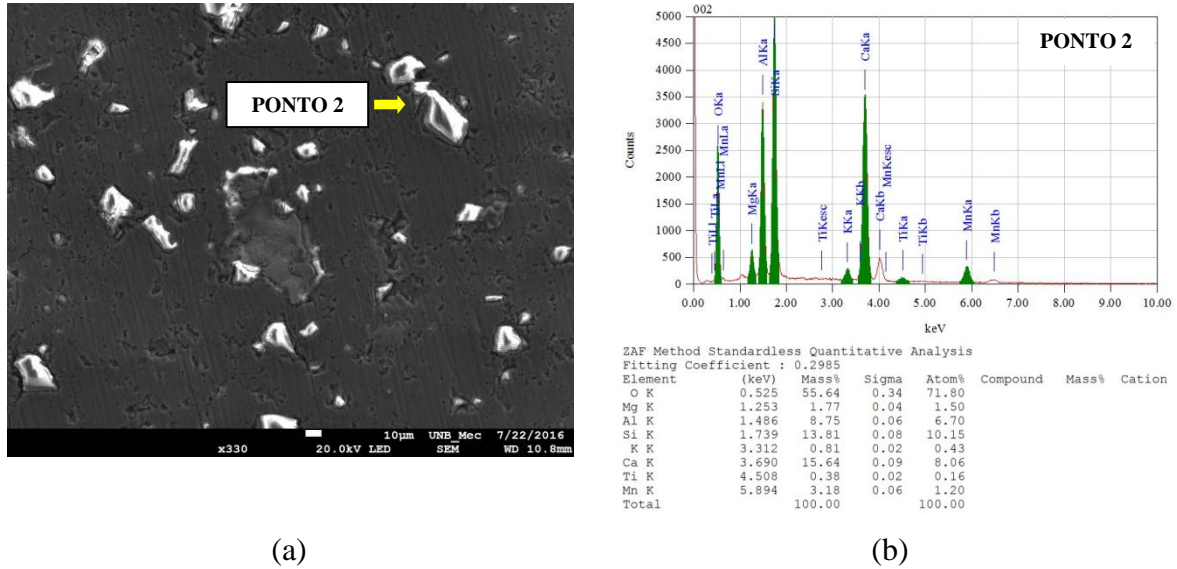


Figura 4.9 – Imagens de MEV e resultado de EDS do compósito sinterizado de liga alumínio AA6061 reforçado com partículas de escória de alto forno a carvão vegetal na concentração de (a) 20%.

Fonte: Autor

Para as concentrações de 25 e 30% de escória, é possível observar nas figuras 4.10(a) e 4.10(b) uma quantidade maior de porosidade no material, principalmente quando comparadas com teores mais baixos de escória.

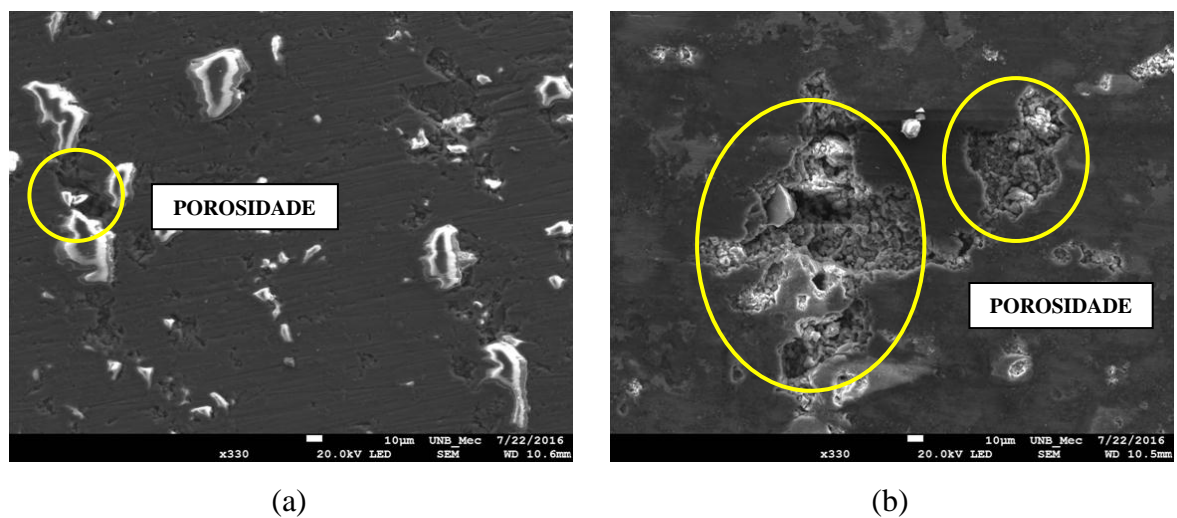


Figura 4.10 – Imagens de MEV do compósito sinterizado de liga alumínio AA6061 reforçado com partículas de escória de alto forno a carvão vegetal nas concentrações de (a) 25% e (b) 30%.

Fonte: Autor

Além da presença de poros, observa-se também uma maior heterogeneidade do material no que diz respeito à distribuição e tamanhos das partículas de escória, inclusive com a formação de aglomerados (figura 4.10(b)). A ocorrência de porosidade em materiais submetidos à sinterização pode indicar, entre outros fatores, que o processo não ocorreu por completo, tendo sido prejudicado (retardado), portanto, pela elevada concentração de particulados finos de escória (cerâmicos), que impediram de alguma forma a migração dos contornos e a completa difusão entre as partículas (GERMAN, 1984).

## 5 CONCLUSÕES

1. Foi possível obter o compósito de liga de alumínio AA6061 reforçado com diferentes concentrações de partículas de escória de alto forno a carvão vegetal via metalurgia do pó;

2. A inserção do particulado de escória na liga de alumínio provocou um acréscimo na dureza do material, sem alterar de forma significativa a sua densidade, quando comparado com a liga obtida pelo mesmo processo;

3. Quanto maior a concentração de reforço, maior a dureza do compósito. No entanto, a partir de 25% de reforço, o valor desta propriedade cai acompanhado pela queda na densidade do material. Tal comportamento pode ser justificado pelo surgimento de porosidades residuais o que indica que a sinterização do material foi prejudicada ou retardada pela elevada concentração de reforço.

4. Apesar de ser considerada um resíduo da aciaria, a escória de alto forno a carvão vegetal, na sua forma particulada, constitui um eficiente reforço para a liga de alumínio AA6061, conferindo a este resíduo uma nova possibilidade de aproveitamento na indústria metal-mecânica, além de contribuir com a questão ambiental.

## **6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

1. Realizar ensaios de tração e flexão com o intuito de determinar a influência da adição da escória em diferentes teores em outras propriedades mecânicas, tais como módulo de elasticidade, resistência mecânica e rigidez;
2. Avaliar a influência do aumento da pressão de compactação, da temperatura e do tempo de sinterização na densificação e no comportamento mecânico do compósito;
3. Verificar a possibilidade de obtenção deste mesmo compósito através do processo de fusão.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, <http://www.abal.org.br>.
- ALCAN. Manual de Soldagem. Alcan Alumínio do Brasil S/A, 1. ed., 1993.
- ALMACO – Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos, <http://www.almaco.org.br>.
- ALMEIDA, Diego de Souza. **Avaliação da influência dos parâmetros de processo de soldagem MIG no surgimento de poros em tubos de alumínio.** 2012.
- AMORIM, Fred Lacerda et al. **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais plásticos.**2002.
- ÂNGULO, Sérgio Cirelli; ZORDAN, Sérgio Edurado; JOHN, Vanderley Moacyr. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** São Paulo: SP, 2001.
- ARIMOND, J.; Ayles, W.R. **Phenolics Creep up on Engine Applications**, Advanced Materials & Processes, n.6, p.34-37, 1993.
- ARSENAULT, R.J. **Interfaces in Metal Matrix Composites.** Scripta Metallurgica et Materialia, v.18, p.1131-1134, 1984.
- ARSENAULT, R.J., Fisher, R.M. **Microstructure of Fiber and Particulate SiC in 6061 Aluminum Composites**, Scripta Metallurgica et Materialia, v.17, p.67-71, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 6508-1: materiais metálicos: ensaio de dureza Rockwell: apresentação. Rio de Janeiro, 2008.
- BACON, M. **Metal Matrix Composites - Engineeing Materials Solutions.**Materials Edge, p.33 - 41, July/August -1989.
- BARDAL,A., Høier, R. **Interfaces in Cast Al-SiC Composites - Effects of Alloying Elements and Oxide Layers**; *ibid* 24. p.205-210.
- BECKHOFF, B.; KANNGIEßER, B.; LANGHOOF, N.; WEDELL, R.; WOLFF, H. **Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis.** 1 ed. Berlin-London: Springer, 2006.
- BONELLI, Claudia MC et al. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico de compósitos de polietileno de alta densidade reciclado com fibra de piaçava.** POLIMEROS CIENCIA E TECNOLOGIA, v. 15, n. 4, p. 256, 2005.
- BOWEN, A.W.; Ardakani,M.; Humphreys,?!. **The Effect of Particle Size and Volume Fraction on Deformation and Recrystallisation Textures in Al-SiC Metal Matrix Composites.** *Ibid* 32. p. 241-246.

BUSCH, W.B.; Suthoff, B. **Electron Beam and Friction Weolding of Metal Matrix Composites**, in: **DEVELOPMENTS IN THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF COMPOSITE MATERIALS**, (6th ECCM- European Conference on Composite Materials), setembro-1993, Bordeaux-FR, ed. A.R.Bunsell et alli, Woodhead Publishing Limited, p.545-551, 1993.

Callister, W.D., 2008, “**Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**”, LTC, Rio de Janeiro, Brazil.

CARVALHO, Marcio. **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**, São Paulo – SP, 2009.

CHIAVERINE, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2ªed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 205p.

CHAWLA, K.K. **Compostie Materials : Science and Engineering**, New York, Spring Verlag, 1987, p.3 (Materials Research and Engineering, ed.B.Ilchner, N.J.Grant).

CHOI, J.; KONG, Y.; Kim, H.; AM, J. *Ceram. Soc.* 81 (1998) 1743-1748

CINCOTTO, M. A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V. **Caracterização da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado**. Boletim do IPT, 1992.

CONSTANTINO, Vera R. Leopoldo et al. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático**. *Química Nova*, v. 25, n. 3, p. 490-498, 2002.

COUTINHO, A.S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. 3ª ed., v.1. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1997. 401p. ISBN 972-49-0326-5.

CRONJAGEN, L.; MEISTER, D. - **Drilling of fibre reinforced aluminium metal matrix composites: Property optimisation and applications** – City Conference Centre London – 8-9 november 1989. p 14.1-14.3.

DA COSTA, C. E.; VARGAS, M.; PARUCKER, M. L. **Estudo das condições de tratamentos térmicos de ligas de alumínio e compósitos obtida via Metalurgia do Pó**. Jornadas SAM–CONAMET-AAS 2001, 2001.

DE ALMEIDA BRAGA, Neila; FERREIRA, Neidenêi Gomes; CAIRO, Carlos Alberto Alves. **Obtenção de titânio metálico com porosidade controlada por metalurgia do pó**. *Quim. Nova*, v. 30, n. 2, p. 450-457, 2007.

DE BRITO, F. Iran Gomes; MEDEIROS, Katarine F.; LOURENÇO, Jorge Magner. **Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó**. *HOLOS*, v. 3, p. 204-211, 2008.

DELFORGE, Daniel Yvan Martin et al. **Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material: uma nova tecnologia para a reciclagem de metais?** *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 60, n. 1, p. 95-100, 2007.



ENGSTROM, U.; LINDBERG, C; TENGZELIUS, J. **Powder and processes for high performance PM steels. Powder Metall**, v.35, n.1, p.67-73, 1980.

FARIA, P.E.; ABRÃO, A.M., **Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos: uma revisão bibliográfica**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

FILHO, Francisco Ambrozio. **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**, São Paulo – SP, 2009.

FINOT, M., Shen, Y.L., Needleman, A., Suresh, S. Micromechanical Modeling of Reinforcement Fracture in Particle-Reinforced Metal-Matrix Composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, V.25A, p.2403-2420, 1994.

FIORELLI, Juliano. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. 2002. Tese de Doutorado. INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS.

FREDEI, M.C.; Alarcon, E.E.; Klein, A.N. **Componentes de Al Sinterizado: Tecnologia de Fabricação e Caracterização Mecânico-Microestrutural**. In: CBECIMAT,9, Águas de São Pedro-SP. Anais. v.1.

FUJIWARA, C. **Processing, Microstructure and Mechanical Properties Of Silicon Carbide Particulate Reinforced Aluminium Alloys**, Dissertação de Mestrado apresentada no Massachusetts Institute of Technology (USA), 1986.

GHADIRI M., FARHADPOUR, F.A., CLIFT R., SEVILLE, J.P.K. **Particle characterization size and morphology**, *The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy - An Overview*. London, p.56-75, 1991.

GOMES, Jefferson de Oliveira et al. **Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de alumínio AMP8000 e na liga de cobre Cu-Be**. 2001.

Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, <http://www.metalurgiadopo.com.br>

HARRIS, B. **Engineering Composite Materials**, Publ. The Institute of Metals, p.1-13, 1986. Fantozzi, G.; Olagnon, C. *ibid* 1. cap.5 (Ceramic Matrix Composites), p.183-238.

HENSHALL, G.A., Kassner, M.F., **McQueen: Dynamic Restoration Mechanisms in Al-5.8% at. Mg Deformed to Large Strains in the Solute Drag Regime**. *Metallurgical Transactions A*, v.23A, p.881-889, 1992.

HENRIQUES, Rachel Martins. **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: uma Abordagem Tecnológica**. 2004. 189f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

HERAKOVICH, C. T., **Mechanics of Fibrous Composites**, University of Virginia, 1998;

HUMPHREYS, F.J.; Miller, W.S.; Djazeb,M.R. **Microstructural Development During Thermomechanical Processing of Particulate Metal Matrix Composites**. Material Science & Technology, v.6, p.1 157-1166, 1990.

HUNT JR., W.H. **A Perspective on the Development of Metal Matrix Composites**, Meeting of the Detroit Section of The Metallurgical Society, mach/1988.

IERVOLINO, Fernando. **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**, São Paulo – SP, 2009.

JENSEN,D.J., Liu,Y.L., Hansen,N. **Hot Extrusion of Al-SiC. Textures and Microstructures**, *ibid* 24. p.417-422.

JEONG, H., HSU, D.K., SHANNON, R.E., LIAW, P.K. **Characterization of Anisotropic Elastic Constants of Silicon Carbide Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites: Part I e II**, *Metallurgical and Material Transactions A*, v.25A, p.799-819, 1994.

JESUS, Edilson Rosa Barbosa de. **OBTENÇÃO, USINAGEM E DESGASTE DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA PROCESSADOS VIA METALURGIA DO PÓ**. 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

JOSEPH, Kuruvilla; MEDEIROS, Eliton S.; CARVALHO, Laura H. **Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 9, n. 4, p. 136-140, 1999.

KALPAKJIAN, S., **Manufacturing Engineering & Technology**, 4th ed, Addison Wesley, 2000

KELLY, A. **Structure and Properties of Composites**. , VCH Publishers Inc. Basel, V.13 (vol. editor Chou, T.W.), cap.1, p.3, 1993. (*Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment*, ed. Cahn, R.W., Haasen, P., Kramer, E.J.).

KELLY, A. **Composite Principles, in: Fatigue and Creep of Composite Materials**, (3rd RIS0), Roskilde, Denmark, 1982. *Proceedings*, ed. H. Lilholt et al., p.51-61.

KOBAYASHI, M., & Nobre, A. D. (2008). **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 18(2), 92-99.

KOCH, C. C., (1998). **“Intermetallic matrix composites prepared by mechanical alloying, a review”**. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 244 (1998) 39–48

KUBEL Jr., E.J. **Reinforced Polymer Composites on the Move**. *Advanced Materials & Processes*, n.5, p.29-36, 1988.

KUCZYNSKI G.C. **Fundamentals of sintering theory, in powder metallurgy for high-performance application**. Syracuse University Press, Binghamton, N.Y., p.101-117, 1972.

LABAHN, O.; KOAHLAAS, B. **Prontuario del cemento**. 5 ed. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1985.

LAMMINEN, L. **Incremental Sheet Forming with an Industrial Robot–Forming Limits and Their Effect on Component Design**. In: Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2005. p. 457-464.

LENEL F.V. **The early stage of the mechanism of sintering, in powder metallurgy for high-performance application**. Syracuse University Press, Binghamton, N.Y., p.119-137, 1972.

Lienkamp, M. Comment on "**The Ultimate Tensile Strength of Metal and Ceramic-Matrix Composites**, M.Y.He, A.G.Evans, W.A. Curtin, Acta Metall Mater 41, 871-878 (1993)"; Scripta Metallurgica et Materialia, v.31, n.12, p.1755-1756, 1994.

LOBERTO, Amauri. **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**, São Paulo – SP, 2009.

MARINELLI, Alessandra L. et al. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.

MARTINS, MAP; ARAÚJO, H. N.; PELLIZZARO, Marli. **Estudo de Compósitos com Produtos de Reciclagem**. XXXI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2009.

MATHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. - **Composite Materials: Engineering and Science** - Chapman & Hall - 15t edition – 1994. p 3-8.

MELLO, André Luís Nunes. **Análise Experimental da Vida em Fadiga de trincas Propagadas em Placas de Alumínio Reparadas com Material Compósito**. 2005. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

Metallum – Congressos Técnicos e Científicos, <http://metallum.com.br/index.php>.

Metals Handbook, American Standard Mechanical Engineering, volume 6, 9ª Ed., 1994.

**Mold Materials for the Plastics Industry**. Catálogo da Thyssen Copper and Brass Sales, 2000.

MOSELEY, J.D., Nowak, R.M. **Engineering Thermoplastics: Materials for the Future**, Chemical Engineering Progress, junho-1981.

MOURISCO, Aroldo José. **Preparação e caracterização de compósito de matriz de alumínio 1100 com partículas de SiC por metalurgia do pó**. 1995. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SAO PAULO.

MASSUCATO, C. J. **Utilização de Escória de Alto-Forno à Carvão Vegetal como Adição no Concreto**. 2005.105f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005

NEWAZ, G.M. *ibid* 1. cap.3 (**Polymer Matrix Composites**), p.89-120

ORLANDIN, Juliano. **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**, São Paulo – SP, 2009.

PIAU, W. C. **Viabilidade do uso de escória como corretivo e fertilizante**. 1991. 99 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

POTTER, Kevin. **Resin Transferring Molding**. London. Chapman e Hall, 1997.

PRANGNELL, P.B.; Downes, T.; Stobbs, W.M.; Withers, P.J., **The Deformation of Discontinuously Reinforced MMCs-I**. The Initial Yielding Behaviour, *Acta Metallurgica et Materialia*, v.42, n.10, p.3425-3436, 1994.

RACK, H.J. **Fabrication of High Performance Powder-Metallurgy Aluminium Matrix Composites, in: Metal-Matrix Composites**. Vienna, UNIDO, 1990, p.80-91, (*Advances in Material Technology: Monitor*, v. 17).

REN, B., Morris, J.G. **Microstructure and Texture Evolution of Al During Hot and Cold Rolling**, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v.26A, p.31-40, 1995.

REZENDE, Mirabel C.; BOTELHO, Edson C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, v. 10, n. 2, p. e4-e10, 2000.

REZENDE, Mirabel C. **Fractografia de compósitos estruturais**. *Polímeros*, v. 17, n. 3, p. E4-E11, 2007.

RUIZ-NAVAS, E.M; FOGAGNOLO, J.B.; VELASCO, F.; RUIZ-PRIETO, J.M.; FROYEN, L., One step production of aluminium matrix composite powders by mechanical alloying, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Volume 37, Issue 11, November 2006.

SILVA, A.G.P., ALVES JUNIOR, C.; **A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização**. *Cerâmica*, v.44,n.290,São Paulo,1998.

SILVESTRE FILHO, Geraldo Dantas. **Comportamento mecânico do poliuretano derivado de óleo de mamona reforçado por fibra de carbono: contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA, R.O.A. et al., Janeiro / Março, 2009, “**Avaliação da Dureza Vickers de Resinas Compostas de Uso Direto e Indireto**”, *Cienc. Odontol. Bras.*, v.12, n.1, p.23-30.

STADTLER W.A. **Production of Metallurgy Parts**. ASTM, Powder Metallurgy, Ohio, p.449-463, 1989.

SURYANARAYANA, C., **Mechanical Alloying and Milling, Progress in Materials Science**, Volume 46, Issues 1-2, January 2001.

TAYA, M.; ARSENAULT, R. J. - **Metal Matrix Composites Thermomechanical Behavior** - Pergamon Press – 1989. p 5-8/209-221.

TAYA, M., Lulay, K.E., Lloyd, D.J. **Strengthening of Particulate Metal Matrix Composite by Quenching**, Acta Metallurgica et Materialia, v.39,n.1, p.73-87, 1991.

UCHIKAWA, H. **Effect of blending components on hydration and structure formation**. In: Proceedings of 8th International Congress of the Chemistry of Cements, Rio de Janeiro, vol. I, p. 249-280, 1986.

VELTEN, Rodrigo Zorzal et al. **Caracterização mecânica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída para aplicações em estradas florestais**. Revista Árvore, v. 30, n. 2, p. 235-240, 2006.

VENTURA, Ana Mafalda FM. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009.

WAO – World Aluminium Organization, <http://www.world-aluminium.org>. **Aluminium for Future Generations Sustainability Update: 2003 data (2004)**.

WATTS, A.A. **Commercial Opportunities for Advanced Composites**, in: ASTM Special Technical Publication 704, p.6-43, 1980.

XU,X.Q., Watt,D.F. **Basic Role of a Hard Particles in a Metal Matrix Subjected to Tensile Loading**, Acta Metallurgica et Materialia, v.42, n.U, p.3717-3729, 1994.

YAMAGATA, H. **Microstructural Evolution of Single Crystalline Aluminum During Multiphase Stress Oscillation at 623K**, Scripta Metallurgica et Materialia, 1992, v.27,n.9, p. 1157-1160.

YOSHIMURA, H.N. **Produção e Caracterização de Compósitos de Matriz de Al Reforçado com Partículas de SiC Obtidospor Extrusão de Pós**, Dissertação de Mestrado apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.

ZANATTA, André Marcon. **DISSERTAÇÃO DE MESTRADOINFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO E DO TIPO DE REFORÇONAS PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS A BASE DE LIGAS DE ALUMÍNIOOBTIDOS VIA METALURGIA DO PÓ**. Joinville 2007.

ZHANG, D. L. **Processing of advanced materials using high-energy mechanical milling**, Progress in Materials Science, 49, 537–560, 2004.

ZHANG, F L.; WANG, C. Y.; ZHU, M., (2003). **Nanostructured WC/Co composite powder prepared by high energy ball milling**. Scripta Materialia. Vol. 49, pp. 1123 -1128.

ZEBARJAD, S.M.; SAJJADI, S.A., **Dependency of physical and mechanical properties of mechanical alloyed Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite on milling time**, Materials & Design, In Press, Corrected Proof, Available 2006.



<b>Média</b>	7,51	27,89	7,33	27,91	7,57	27,85
<b>Raio (mm)</b>	13,945		13,955		13,925	
<b>Raio (m)</b>	0,013945		0,013955		0,013925	
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	0,000610924		0,0006118		0,000609172	
<b>Altura (m)</b>	0,00751		0,00733		0,00757	
<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	4,58804E-06		4,48449E-06		4,61144E-06	
<b>Tensão (Pa)</b>	481729621,8		481039464,9		483114399	
<b>Massa antes (g)</b>	11,16		11,13		11,28	
<b>Massa antes (kg)</b>	0,01116		0,01113		0,01128	
<b>Massa depois (g)</b>	11,5682		11,6005		11,7252	
<b>Massa depois (kg)</b>	0,0115682		0,0116005		0,0117252	
<b>Densidade antes (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2432,413178		2481,884892		2446,092859	
<b>Densidade depois (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2521,383703		2586,801948		2542,63546	

<b>Medidas</b>	<b>Amostra 1</b>		<b>Amostra 2</b>		<b>Amostra 3</b>	
	<b>Espessura</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Espessura</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Espessura</b>	<b>Diâmetro</b>
<b>1</b>	7,45	27,95	6,55	27,95	7,65	27,75
<b>2</b>	7,25	27,85	6,95	27,85	6,85	27,95
<b>3</b>	7,05	27,95	8,05	27,85	6,65	27,75
<b>4</b>	7,15	27,85	8,15	27,85	7,35	27,85
<b>5</b>	7,25	27,95	7,85	27,95	7,55	27,95
<b>Soma</b>	36,15	139,55	37,55	139,45	36,05	139,25
<b>Média</b>	7,23	27,91	7,51	27,89	7,21	27,85
<b>Raio (mm)</b>	13,975		13,975		13,975	
<b>Raio (m)</b>	0,013975		0,013975		0,013975	
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	0,000613555		0,000613555		0,000613555	
<b>Altura (m)</b>	0,00723		0,00751		0,00721	
<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	4,436E-06		4,6078E-06		4,42373E-06	
<b>Tensão (Pa)</b>	479663592,9		479663592,9		479663592,9	
<b>Massa antes (g)</b>	10,76		11		10,83	
<b>Massa antes (kg)</b>	0,01076		0,011		0,01083	
<b>Massa depois (g)</b>	11,4225		11,1682		11,5038	
<b>Massa depois (kg)</b>	0,0114225		0,0111682		0,0115038	
<b>Densidade antes (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2425,607173		2387,257367		2448,15937	
<b>Densidade depois (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2574,953339		2423,760703		2600,474216	

15% de escória

	Medidas	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
		Espessura	Diâmetro	Espessura	Diâmetro	Espessura	Diâmetro
20% de escória	1	6,93	28,25	6,79	28,35	7,50	28,20
	2	6,97	28,17	6,41	28,42	7,30	20,10
	3	7,42	28,19	6,58	28,19	7,10	28,05
	4	7,80	28,27	7,22	28,33	7,50	28,20
	5	7,36	28,07	7,21	28,36	7,70	28,15
	Soma	36,48	140,95	34,21	141,65	37,10	132,70
	Média	7,296	28,19	6,842	28,33	7,42	26,54
	Raio (mm)	14,095		14,165		13,27	
	Raio (m)	0,014095		0,014165		0,01327	
	Área (m <sup>2</sup> )	6,24137E-04		6,30352E-04		5,53212E-04	
	Altura (m)	0,007296		0,006842		0,00742	
	Volume (m <sup>3</sup> )	4,55370E-06		4,31287E-06		4,10483E-06	
	Tensão (Pa)	4,71531E+08		4,66882E+08		5,31984E+08	
	Massa antes (g)	10,5914		10,2301		10,3419	
	Massa antes (kg)	0,0105914		0,0102301		0,0103419	
	Massa depois (g)	12,3155		11,2817		11,391	
	Massa depois (kg)	0,0123155		0,0112817		0,011391	
Densidade antes (kg/m <sup>3</sup> )	2,32589E+03		2,37200E+03		2,51944E+03		
Densidade depois (kg/m <sup>3</sup> )	2,70450E+03		2,61582E+03		2,77502E+03		
25% de escória	Medidas	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
		Espessura	Diâmetro	Espessura	Diâmetro	Espessura	Diâmetro
	1	8,64	28,09	6,45	28,12	6,37	28,16
	2	8,52	28,35	6,67	28,12	6,87	28,28
	3	8,82	28,26	6,98	28,33	7,42	28,31
	4	8,14	28,00	7,27	28,26	7,02	28,20
	5	8,04	28,20	6,58	28,28	6,69	28,18
	Soma	42,16	140,90	33,95	141,11	34,37	141,13
	Média	8,432	28,18	6,79	28,222	6,874	28,226
	Raio (mm)	14,09		14,111		14,113	
	Raio (m)	0,01409		0,014111		0,014113	
Área (m <sup>2</sup> )	6,23694E-04		6,25555E-04		6,25732E-04		
Altura (m)	0,008432		0,00679		0,006874		



<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	5,25899E-06	4,24752E-06	4,30128E-06
<b>Tensão (Pa)</b>	4,71866E+08	4,70462E+08	4,70329E+08
<b>Massa antes (g)</b>	11,5106	10,5247	10,1051
<b>Massa antes (kg)</b>	0,0115106	0,0105247	0,0101051
<b>Massa depois (g)</b>	12,1949	10,6679	10,2087
<b>Massa depois (kg)</b>	0,0121949	0,0106679	0,0102087
<b>Densidade antes (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2,18875E+06	2,47785E+06	2,34932E+06
<b>Densidade depois (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2,31887E+03	2,51156E+03	2,37341E+03

<b>Medidas</b>	<b>Amostra 1</b>		<b>Amostra 2</b>		<b>Amostra 3</b>	
	<b>Espessura</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Espessura</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Espessura</b>	<b>Diâmetro</b>
<b>1</b>	8,00	28,20	7,10	28,00	7,70	28,00
<b>2</b>	6,90	28,10	7,05	28,20	7,95	28,10
<b>3</b>	6,95	28,05	7,20	28,10	8,10	28,15
<b>4</b>	7,70	28,20	7,25	27,70	7,40	28,25
<b>5</b>	7,95	28,10	7,30	27,90	7,70	28,20
<b>Soma</b>	37,50	140,65	35,90	139,90	38,85	140,70
<b>Média</b>	7,50	28,13	7,18	27,98	7,77	28,14
<b>Raio (mm)</b>	14,05		13,95		14,1	
<b>Raio (m)</b>	0,01405		0,01395		0,0141	
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	0,000620158		0,000611362		0,00062458	
<b>Altura (m)</b>	0,0075		0,00718		0,00777	
<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	4,65119E-06		4,38958E-06		4,85299E-06	
<b>Tensão (Pa)</b>	474556297,4		481384357,8		471196617,3	
<b>Massa antes (g)</b>	11,1585		10,7168		11,2154	
<b>Massa antes (kg)</b>	0,0111585		0,0107168		0,0112154	
<b>Massa depois (g)</b>	11,2943		10,7567		11,22	
<b>Massa depois (kg)</b>	0,0112943		0,0107567		0,01122	
<b>Densidade antes (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2399,065101		2441,419414		2311,030358	
<b>Densidade depois (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2428,26195		2450,509126		2311,978228	