



UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALURGIA
E MATERIAIS

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO COMPÓSITO COBRE E CINZAS
LEVES DE CARVÃO PRODUZIDO POR METALURGIA DO PÓ**

DIEGO PACHECO WERMUTH

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA

Porto Alegre – Rio Grande do Sul

2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALURGIA
E MATERIAIS

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO COMPÓSITO COBRE E CINZAS
LEVES DE CARVÃO PRODUZIDO POR METALURGIA DO PÓ**

**DIEGO PACHECO WERMUTH
TECNÓLOGO EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

Trabalho realizado no Laboratório de Transformação Mecânica / Centro de Tecnologia do Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre – Rio Grande do Sul

2015

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer (PPGE3M/UFRGS)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Eduardo Osório
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Prof. Dr. José Carlos Krause de Verney
Universidade Luterana do Brasil - ULBRA

Prof. Dr. Telmo Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

Dedico ao meu pai
Ilmo Wermuth
e a minha mãe
Sandra Pacheco Wermuth

AGRADECIMENTOS

À Deus, pois tenho a certeza de que ele me guiou até aqui;

Ao professor Lírio Schaeffer pela orientação dedicada, pela confiança, incentivo pessoal e amizade.

Aos Doutorandos Vinicius Martins e André Carvalho Tavares, estes com quem pude contar em todos os momentos, mesmo com pouca disponibilidade de tempo, mas principalmente pela verdadeira amizade.

À Morgana Sá Pinheiro Sulzbach Machado, que me propiciou momentos de compreensão e apoio sem restrições, motivação constante, pelo carinho e aconchego dedicados a mim nas horas de cansaço e, principalmente, pelo amor verdadeiro.

Aos meus Avôs paternos, Romeu Valdomiro Wermuth e Olivia Gass Wermuth e Avôs maternos, Fidelis Gianiquini Pacheco e Oslete Pacheco, que se mostraram preocupados sobre a conclusão de meu mestrado e demonstrando sempre o orgulho sobre minha dedicação aos estudos.

Aos colegas e amigos do LdTM, principalmente ao Grupo de Metalurgia do Pó e Grupo de Desenvolvimento de Energia renováveis, pelo companheirismo e amizade.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mais precisamente representada pelo Laboratório de Transformação Mecânica da Escola de Engenharia pela disponibilidade dos recursos materiais e tecnológicos.

À CAPES, Fapergs e ao CNPq pelo apoio através da bolsa de estudos e auxílios.

À empresa Brutt Indústria Metalúrgica pelo material doado ao LdTM, o qual foi utilizado para a realização da pesquisa desta dissertação.

Aos colegas, amigos e professores que contribuíram para minha formação e para que eu me tornasse a pessoa que sou hoje.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

“Trabalhe duro e em silêncio. Deixe que seu sucesso faça o barulho.”

Dale Carnegie

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XI
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XIV
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 Compósitos de Matriz Metálica.....	20
2.2 Metalurgia do Pó.....	22
2.2.1. Obtenção de Pós Metálicos	26
2.2.2 Sinterização	27
2.2.3 Mecanismos da Sinterização	29
2.2.4 Sinterização com atmosfera controlada	30
2.3 Cinzas de carvão produzidas em termoelétricas	30
2.3.1 Cinzas Leves	33
2.3.2 Classificação das cinzas leves.....	34
2.3.3 Aplicações das cinzas.....	34
2.4 Cobre.....	35
2.4.1 Classificação do cobre	36
2.4.2 Aplicações do cobre	37
3. ANÁLISE EXPERIMENTAL	38
3.1 Materiais utilizados.....	38
3.2 Equipamentos e ferramental utilizados.....	39
3.3 Obtenção de corpos de prova por M/P.....	44
3.3.1 Mistura simples de pós de cobre com cinzas leves	44
3.3.1.1 Compactação de amostras de cobre com cinzas leves	44
3.3.1.1.1 Compactação de cobre com 20% de cinzas leves.....	45
3.3.1.1.2 Compactação de cobre com 15% de cinzas leves.....	46
3.3.1.1.3 Compactação de cobre com 10% de cinzas leves.....	47
3.3.1.1.4 Compactação de cobre com 5% de cinzas leves.....	47
3.3.1.2 Sinterização das amostras obtidas após mistura simples de pós	48

3.3.1.3	Análise dos corpos de prova obtidos após mistura simples de pós	48
3.3.1.3.1	Densidade	48
3.3.1.3.2	Metalografia.....	50
3.3.1.3.3	Microdureza.....	51
3.3.2	Moagem dos pós em moinho de bolas	52
3.3.2.1	Compactação de amostras obtidas após moagem de pós	52
3.3.2.2	Pré aquecimento de amostras obtidas após moagem de pós	52
3.3.2.3	Sinterização de amostras obtidas após moagem de pós	52
3.3.2.4	Análise dos Corpos de prova obtidos após moagem de pós.....	53
3.3.2.4.1	Densidade	53
3.3.2.4.2	Metalografia.....	54
3.3.2.4.3	Microdureza.....	54
3.3.3	Moagem de alta energia dos pós em moinho planetário	54
3.3.3.1	Compactação de amostras obtidas após moagem de alta energia dos pós	55
3.3.3.2	Pré-aquecimento de amostras obtidas após moagem de alta energia dos pós..	55
3.3.3.3	Sinterização de amostras obtidas após moagem de alta energia dos pós	55
3.3.3.4	Análise dos Corpos de prova obtidos após moagem de alta energia dos pós ..	56
3.3.3.4.1	Densidade	56
3.3.3.4.2	Metalografia.....	56
3.3.3.4.3	Microdureza.....	56
3.4	Microscopia eletrônica de varredura das amostras de Cobre5%Cinzas leves	56
3.5	Análise via EDS das amostras de Cobre5%Cinzas leves	57
3.6	Resistividade elétrica das amostras de Cobre5%Cinzas leves.....	57
4.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	59
4.1	Mistura simples de pós	59
4.1.1	Compressibilidade e densidade de amostras obtidas após mistura simples de pós..	59
4.1.2	Metalografia de amostras obtidas após mistura simples dos pós.....	60
4.1.2.1	Análise microestrutural	60
4.1.3	Microdureza de amostras obtidas após mistura simples dos pós	61
4.2	Moagem de pós por moinho de bolas	62
4.2.1	Densidade das amostras obtidas após moagem por moinho de bolas.....	62
4.2.2	Metalografia de amostras obtidas após moagem por moinho de bolas.....	62
4.2.2.1	Análise microestrutural	62
4.2.3	Microdureza de amostras obtidas após moagem por moinho de bolas.....	63

4.3 Moagem de Alta Energia dos pós	64
4.3.1 Densidade das amostras obtidas após moagem de alta energia	64
4.3.2 Metalografia de amostras obtidas após moagem de alta energia	64
4.3.2.1 Análise microestrutural	64
4.3.2 Microdureza de amostras obtidas após moagem de alta energia	65
4.4 Análise da porosidade do compósito de cobre com 5% de cinzas leves	66
4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura do compósito de cobre com 5% de cinzas leves .	67
4.6 Análise via EDS do compósito de cobre com 5% de cinzas leves	72
4.7 Resistividade elétrica das amostras de cobre com 5% de cinzas leves.....	76
5. CONCLUSÕES	77
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
REFERÊNCIAS	81

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Pressão	[MPa]
ρ	Densidade	[g/cm ³]
ρ ap.	Densidade Aparente	[g/cm ³]
ρ s.	Densidade do sinterizado	[g/cm ³]
ρ v.	Densidade verde	[g/cm ³]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCM	Associação Brasileira do Carvão Mineral
Cz	Cinzas leves
EDS	Análise química quantitativa por espectroscopia de dispersão de energia
IACS	International Annealed Copper Standard
IEA	International Energy Agency
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
M/P	Metalurgia do Pó
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIM	Moldagem por Injeção de Pós Metálicos
MMCs	Compósitos de Matriz Metálica
PIE	Destino de energia para produção independente
PPA	Power Purchase Agreement
SP	Destino de energia para serviço público
UNS	Sistema de classificação unificado
WCI	World Coal Institute

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estudos e possíveis aplicações de cinzas de carvão.....	18
Figura 2 – Principais trabalhos do LdTM empregando cinzas de carvão	19
Figura 3 – Rota Simplificada da M/P : (a) mistura; (b) compactação; (c) sinterização [37]	24
Figura 4 – Formas geométricas de partículas [39]	25
Figura 5 – Moinho de bolas IAE – Instituto de Aeronáutica e Espaço [40]	26
Figura 6 – Etapas do processo de sinterização convencional [31]	28
Figura 7 – Tipos de carvão, reservas e usos [50]	32
Figura 8 – Bobinas (a) e tubos de cobre (b) [88].....	37
Figura 9 – Metodologia utilizada na dissertação	38
Figura 10 – Misturador de pós.....	39
Figura 11 – Matriz de compactação	40
Figura 12 – Prensa Hidráulica BOVENAU 30 toneladas.	40
Figura 13 – Forno de Sinterização.	41
Figura 14 – Politriz AROTEC AROPOL 2V	41
Figura 15 – Microscópio Olympus GX51F.....	42
Figura 16 – Microdurômetro ISH-TDV1 000	42
Figura 17 – Moinho de Bolas	43
Figura 18 – Moinho planetário RETSCH - PM Grind Control 500.....	43
Figura 19 – Amostras com trincas devido a excesso de pressão na compactação.	45
Figura 20 – Curva de compressibilidade da liga Cu20%Cinzas.	46
Figura 21 – Curva de compressibilidade da liga Cu15%Cinzas.	46
Figura 22 – Curva de compressibilidade da liga Cu10%Cinzas.	47
Figura 23 – Curva de compressibilidade da liga Cu5%Cinzas	48
Figura 24 – Curva de densidade a verde e densidade do sinterizado – Cu20%Cz.....	49
Figura 25 – Curva de densidade a verde e densidade do sinterizado – Cu15%Cz.....	49
Figura 26 – Curva de densidade a verde e densidade do sinterizado – Cu10%Cz.....	50
Figura 27 – Curva de densidade a verde e densidade do sinterizado – Cu5%Cz.....	50
Figura 28 – Anéis para teste de resistividade	57
Figura 29 – Ensaio de resistividade.....	57
Figura 30 – Metalografia sem ataque químico – amostra de mistura simples de pós.....	60
Figura 31 – Metalografia com ataque químico – amostra de mistura simples de pós.....	61
Figura 32 – Metalografia sem ataque químico – amostra de moagem por moinho de bolas	62

Figura 33 – Metalografia com ataque químico – amostra de moagem por moinho de bolas....	63
Figura 34 – Metalografia sem ataque químico – amostra de moagem de alta energia	64
Figura 35 – Metalografia com ataque químico – amostra de moagem de alta energia	65
Figura 36 – Amostras obtidas pelos diferentes processos. (a) mistura simples de pós; (b) moagem em moinho de bolas; (c) moagem de alta energia.	66
Figura 37 – Pó de Cobre5%Cinzas leves após mistura simples de pós.....	67
Figura 38 – Pó de Cobre5%Cinzas leves após 100 horas de moagem em moinho de bolas....	68
(a) ampliação de 350 X; (b) ampliação de 900 X; (c) ampliação de 1300 X.....	68
Figura 39 – Pó de Cobre5%Cinzas leves após 200 horas de moagem em moinho de bolas....	69
Figura 40 – Pó de Cobre5%Cinzas leves após 356 horas de moagem em moinho de bolas....	69
Figura 41 – Pó de Cobre5%Cinzas leves após moagem de alta energia	70
Figura 42 – Amostra sinterizada obtida após mistura simples de pós. Aumentos de 200 X (a) e 2500 X (b)	71
Figura 43 – Amostra sinterizada obtida após moagem dos pós por moinho de bolas - Aumento de 1000 X.....	71
Figura 44 – Amostra sinterizada obtida após moagem de alta energia dos pós	72
Figura 45 – Pontos quantificados pelo ensaio de EDS na amostra com pós de mistura simples.....	73
Figura 46 – Pontos analisados em EDS - amostra com pós de 100 horas de moagem em moinho de bolas.....	74
Figura 47 – Pontos analisados em EDS - amostra com pós de moagem de alta energia	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Energia e a matéria prima utilizada em vários processos de fabricação [29].....	22
Tabela 2 – Centrais termoelétricas a carvão mineral em operação no Brasil [52]	33
Tabela 3 – Características técnicas do cobre eletrolítico dendrítico [90].....	39
Tabela 4 – Análise por perda ao fogo em espectrômetro por fluorescência de raios-x.....	39
Tabela 5 – Densidade aparente dos compósitos cobre com cinzas leves.	44
Tabela 6 – Dados obtidos das amostras verdes de cobre com 20% de cinzas leves.....	45
Tabela 7 – Dados obtidos das amostras verdes de cobre com 15% de cinzas leves.....	46
Tabela 8 – Dados obtidos das amostras verdes de cobre com 10% de cinzas leves.....	47
Tabela 9 – Dados obtidos das amostras verdes de cobre com 5% de cinzas leves.....	47
Tabela 10 – Dureza Vickers média das amostras sinterizadas obtidas por mistura simples de pós.....	51
Tabela 11 – Dados físicos obtidos das amostras Cobre5%Cinzas leves após 100 horas de moagem de pós.	53
Tabela 12 – Dados físicos obtidos das amostras Cobre5%Cinzas leves após 200 horas de moagem de pós.	53
Tabela 13 – Dados físicos obtidos das amostras Cobre5%Cinzas leves após 356 horas de moagem de pós.	54
Tabela 14 – Microdureza das amostras sinterizadas obtidas após moagem por moinho de bolas.....	54
Tabela 15 – Densidade das amostras Cobre5%Cinzas leves após moagem de alta energia dos pós.	56
Tabela 16 – Microdureza das amostras sinterizadas obtidas após moagem de alta energia..	56
Tabela 17 – Resistividade elétrica do compósito Cobre5%Cinzas leves	58
Tabela 18 – Composição química da amostra obtida após mistura simples de pós	73
Tabela 19 – Composição química da amostra obtida após 100 horas de moagem de pós	74
Tabela 20 – Composição química da amostra obtida após moagem de alta energia dos pós	75

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo e aproveitamento de cinzas leves da queima de carvão mineral em termoelétrica, como reforço para o Compósito de Matriz Metálica de cobre. Foram estudados diferentes percentuais de cinzas leves como reforço para o cobre, sendo misturados estes pós através de misturador “duplo v”, compactando os pós em diferentes pressões e sinterizando os corpos de prova obtidos pela compactação. A amostra sinterizada que apresentou a maior dureza entre todos os corpos de prova sinterizados, atingindo 89 HV, foi utilizada como base para a formulação e obtenção de novos corpos de prova, que foram estudados sob condições de moagem dos pós por moinho de bolas e moagem de alta energia. A fabricação do compósito seguiu os padrões industriais do processo de Metalurgia do Pó, como a mistura e moagem dos pós, compactação dos pós e sinterização em atmosfera controlada. Foi realizado o estudo das propriedades físicas e elétricas do compósito formado por cobre e cinzas leves, que comprovou o aumento da dureza para 122 HV, mantendo a condutividade do cobre puro. Este trabalho proporciona uma nova aplicação para as cinzas leves, utilizando estes resíduos de usinas termoelétricas como matéria prima para reforço mecânico na composição de peças à base de cobre, na indústria metalmeccânica.

Palavras chave: Cobre, cinzas leves, compósito-metal-matriz, metalurgia do pó.

ABSTRACT

This paper aims to study and use fly ash from coal-fired thermal power plant, as reinforcement for copper Metal Matrix Composite. Different fly ash percentage were studied as reinforcement for copper. The powders were mixed by “Twin V Mixer”, were compacted at different pressures and the compacted samples were sintered. The sintered sample with the highest hardness among all samples reached 89 HV and was used as basis for the formulation and obtaining of new samples, which were studied under controlled conditions of ball milling and mechanical alloying. The manufacture of the composite was made using Powder Metallurgy processes like mixing and milling of powders, compacting of the powders and sintering at controlled atmosphere. A study on the physical and electrical properties of the composite formed by copper and fly ash was carried out proving the hardness increase to 122 HV and maintaining the conductivity of pure copper. This work provides a new application for fly ash using these power plants waste as raw material for mechanical reinforcement in the composition of copper parts in the metalworking industry.

Keywords: Copper, fly ash, metal-matrix-composite, powder metallurgy.

1. INTRODUÇÃO

As cinzas geradas pela queima do carvão mineral em termoelétrica são constituídas de vários óxidos, mas principalmente de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2). Devido a existência destes minerais aluminosilicatos e sabendo que existem estudos de compósitos de cobre com reforço de alumina para melhorar as propriedades mecânicas, o objetivo deste trabalho foi comparar as propriedades físicas de compósitos Cobre-Alumina com o compósito Cobre-Cinzas leves desenvolvidos nesta pesquisa.

Muitos estudos são realizados visando melhorar as propriedades mecânicas, elétricas e térmicas do cobre. Mesmo tendo resistência mecânica relativamente baixa, se comparado a outros metais, suas ligas são amplamente utilizadas em aplicações tecnológicas que vão desde componentes elétricos em relés convencionais, em absorvedores de elétrons e fótons, em aceleradores síncrotrons e em aplicações estruturais como tubulação para ar condicionado.

Uma das soluções para a utilização do cobre nas aplicações tecnológicas, mencionadas no parágrafo anterior, é o seu endurecimento por elementos de liga, porém este processo pode causar uma significativa perda de condutividade elétrica e corrosão. Outra possibilidade é o endurecimento do cobre pela incorporação de partículas finas, resultando numa diminuição relativamente pequena da condutividade elétrica [1]. Estas partículas finas incorporadas ao cobre podem ser um metal, um composto intermetálico, precipitados de uma solução sólida por um tratamento de envelhecimento, ou ainda por partículas não metálicas, adicionadas ou formadas com a matriz de cobre [2], como por exemplo, alumina (Al_2O_3).

Compósitos de cobre endurecidos através da adição de partículas de alumina, que são óxidos estáveis, não promovem o crescimento ou dissolução de suas partículas na matriz metálica, desta forma é possível manter as características iniciais do material mesmo após aquecimentos futuros [3].

Após a análise das informações descritas acima, decidiu-se utilizar cinzas de carvão, na tentativa de alcançar melhorias nas propriedades mecânicas do cobre, pois estudos desenvolvidos anteriormente no LdTM-Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS comprovam que este resíduo termoelétrico é rico em alumina, sílica e outros óxidos [4 - 8].

É importante ressaltar que as cinzas são resíduos termoelétricos oriundos da combustão do carvão pulverizado em altas temperaturas, entre 1200 e 1600 °C, em ambiente gasoso oxidante, para a fusão total ou parcial da matéria mineral. As cinzas leves são constituídas por partículas extremamente finas com dimensão inferior a 0,150µm [9],

transportadas pelo fluxo dos gases da combustão, coletadas nos ciclones mecânicos ou precipitadores eletrostáticos ou, ainda, lançadas na atmosfera. O conhecimento da composição das cinzas é um parâmetro importante para decidir o seu uso industrial, planejar o local dos depósitos destes resíduos gerados não utilizados, para evitar a contaminação da água e do solo e mitigar outros impactos ambientais [10].

Estudos realizados no LdTM apresentam algumas rotas na utilização destes resíduos através do processo da M/P (Metalurgia do Pó), conforme apresenta a Figura 1.

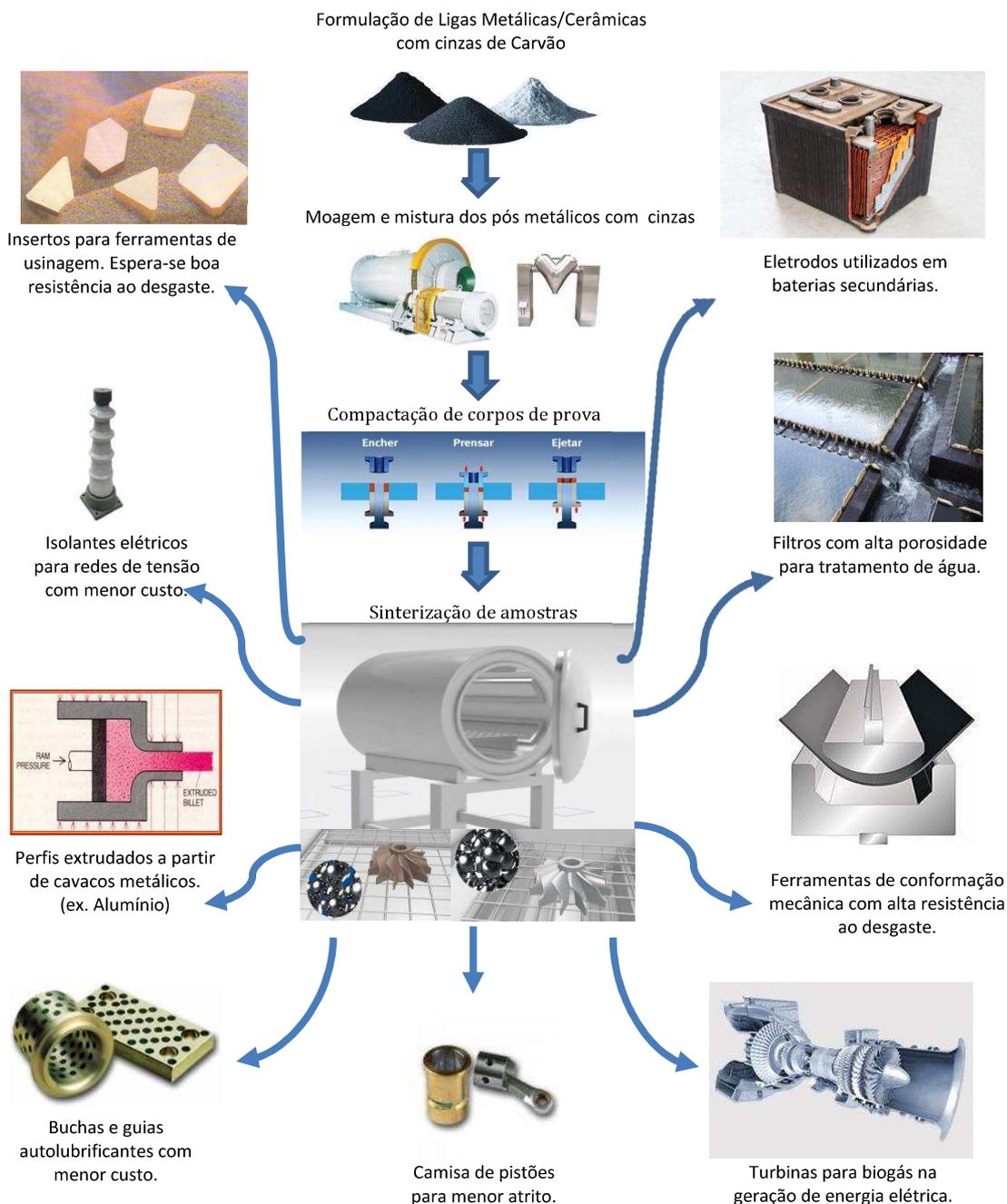


Figura 1 – Estudos e possíveis aplicações de cinzas de carvão

Nesta dissertação foram formulados e analisados compósitos de cobre com reforço de cinzas leves, obtidos pelo processo de Metalurgia do Pó convencional, visando melhorias nas propriedades mecânicas em amostras fabricadas com este compósito.

Este trabalho faz parte de vários outros estudos realizados no LdTM que utilizam cinzas de carvão. A Figura 2 apresenta as principais linhas de pesquisa, empregando cinzas, com resultados já publicados por membros do LdTM.

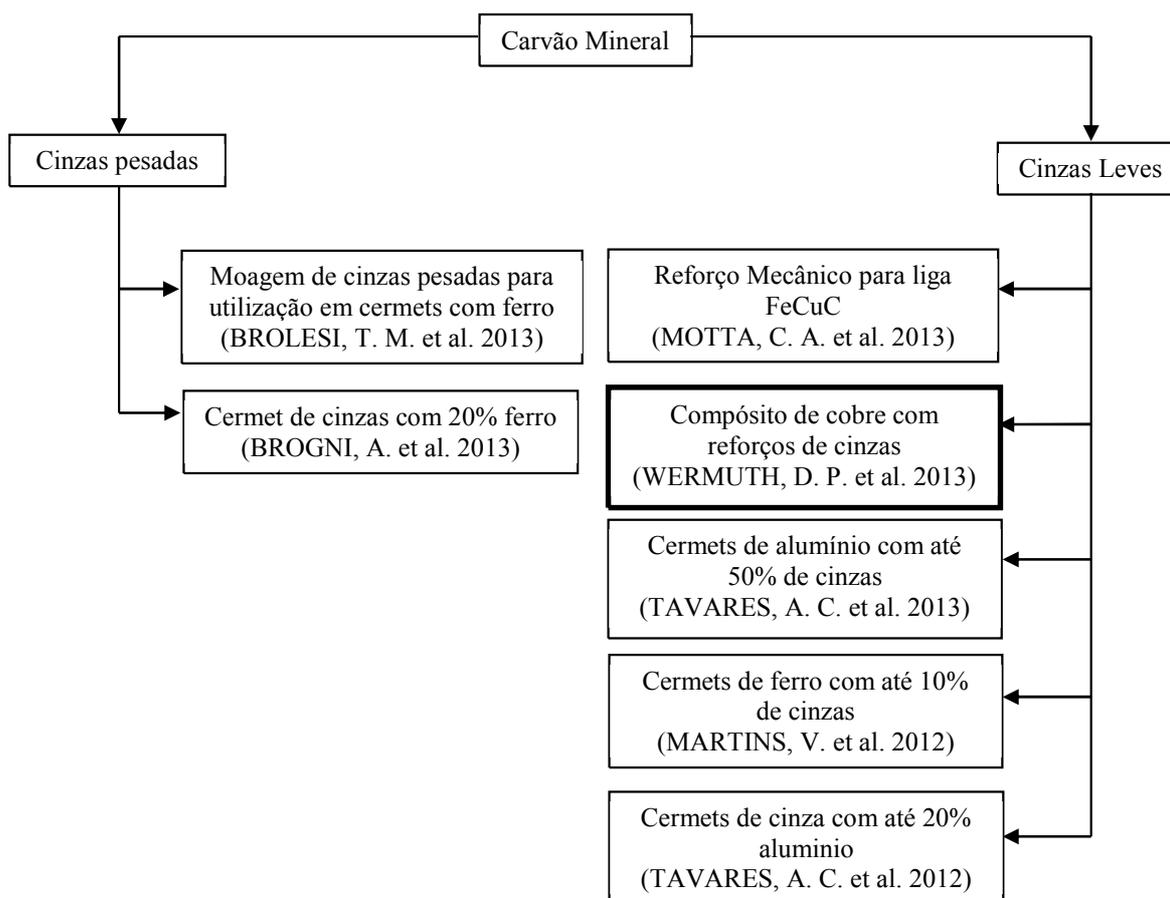


Figura 2 – Principais trabalhos do LdTM empregando cinzas de carvão

O objetivo geral deste trabalho foi produzir um Compósito de Matriz Metálica de cobre reforçado por cinzas leves, oriundas da queima de carvão mineral em termoelétrica, que supere as propriedades físicas e mecânicas do cobre puro. Com isso propiciando a indústria metalmeccânica um compósito de matriz metálica para substituir o cobre puro como matéria prima, garantindo melhores propriedades mecânicas sem que as propriedades elétricas tenham redução significativa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Visando a compreensão dos conceitos aqui apresentados, neste capítulo serão descritos os fundamentos teóricos do processo de Metalurgia do Pó, conceitos e descrição dos principais materiais utilizados neste trabalho.

2.1 Compósitos de Matriz Metálica

Compósitos avançados com base em matriz metálica têm uma história relativamente recente, mas as oportunidades parecem muito promissoras. Os primeiros (*Metal Matrix Composites*) Compósitos de Matriz Metálica - MMCs foram desenvolvidos na década de 1970 para aplicações de alto desempenho [11].

Os MMCs associam as propriedades de metais (ductilidade e tenacidade) com propriedades de cerâmicas (alta resistência e módulo de elasticidade) propiciando maior capacidade de resistência em compressão e de cisalhamento em elevadas temperaturas de trabalho. O uso extensivo de MMCs na indústria aeroespacial, indústria automotiva e em aplicações estruturais tem aumentado nos últimos 20 anos, devido à disponibilidade de reforços baratos e rentáveis, assim como rotas de processamento que dão origem a propriedades reprodutíveis [12]. A zona de contato entre a matriz e o reforço (interface ou interfase) é uma parte essencial dos MMCs. A ligação entre as duas fases se desenvolve a partir de *stress* de atrito interfacial, a interação física e química e tensões térmicas, devido à incompatibilidade dos coeficientes de dilatação térmica da matriz e o reforço. Durante a produção de um MMC o fenômeno interfacial subjacente que regula a transmissão de propriedades térmicas, elétricas e mecânicas é de extrema importância [13].

O recente reconhecimento que a adição de reforços de cerâmica permitem a manipulação de propriedades físicas e mecânicas dos MMCs levou à utilização cada vez mais generalizada destes materiais em aplicações de materiais para eletrônica com excelente controle térmico. As recentes previsões de mercado sugerem uma aceleração do crescimento do uso de MMC devido ao custo mais baixo, o que sugere um futuro promissor para esta classe de materiais.

A pesquisa e o desenvolvimento de MMCs têm aumentado consideravelmente nos últimos 10 anos, devido à melhoria de suas propriedades, como resistência ao desgaste, resistência térmica, resistência à fadiga e maior consistência no desempenho em geral, do que comparado com as ligas de matriz não reforçadas. Os reforços são adicionados

extrinsecamente ou internamente por reação química. As propriedades de MMCs dependem das propriedades do material da matriz, reforços, e a interface matriz-reforço [14].

O cobre tem sido extensivamente utilizado como matriz, devido suas propriedades térmicas e condutividade elétrica. No entanto, o cobre puro não têm propriedades mecânicas aceitáveis para o setor industrial mecânico [2]. A resistência mecânica de cobre pode ser melhorada pelo endurecimento através de envelhecimento ou por dispersão de partículas de reforço. Em geral as ligas de cobre endurecidas são propensas a precipitações grosseiras quando submetidas a altas temperaturas, o que resulta na degradação da resistência do material [15]. A Matriz de cobre pode ter incorporações de reforços contínuos ou descontínuos, como fibras, filamentos emaranhados, fios e partículas. Os reforços são em geral de cerâmica, na forma de óxidos, carbonetos e nitretos. Partículas cerâmicas finas como óxidos melhoram a resistência, a dureza e mantêm estas propriedades a alta temperatura, mas ocasionam uma pequena degradação da condutividade elétrica. Os principais requisitos para os compósitos de partículas dispersas são a estabilidade termodinâmica e química das partículas reforçadas, baixa difusividade e baixa solubilidade na matriz, alta energia interfacial e a proximidade do coeficiente de expansão térmica da matriz e do reforço. A incorporação de Al_2O_3 aumenta a temperatura de recristalização e resistência a elevadas temperaturas [16], possibilitando durezas de 117 HV à 137 HV em MMCs de cobre com 4,1% de Alumina [18] e densidades entre $5,28 \text{ g/cm}^3$ à $6,20 \text{ g/cm}^3$ nas composições com 5% de Alumina [19].

Outras propriedades de MMCs que devem ser destacadas são a alta resistência em relação ao peso e alta rigidez por unidade de densidade, tendo maiores resultados de desempenho com redução no peso e na densidade, aumento da resistência à fluência, maior resistência ao desgaste e redução do coeficiente de expansão térmica do compósito em relação ao metal base puro [17, 20, 21]. Os compósitos de matriz de Cu são extremamente utilizados em indústrias de gerenciamento térmico, materiais resistentes ao desgaste, resistentes ao calor, como por exemplo, dissipadores de calor de amplificadores de potência, dissipadores de calor para a quebra de circuito integrado, núcleos de placas de circuito impresso, placas frias e porta “chips” [22]. Alguns exemplos da aplicação de Cu- Al_2O_3 são lâminas de relés, sistemas aeronáuticos e ferroviários, coletores de corrente, máquinas homopolares, eletrodos de solda, conectores elétricos, componentes para moldes de fundição e em reatores nucleares, como o ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) [23, 24].

Os compósitos de matriz metálica podem ser produzidos por vários processos, tais como fundição, deposição de camada, liga mecânica, SHS (*self propagating high temperature synthesis*) e por metalurgia do pó. Entre estes processos a rota da metalurgia do pó proporciona uma eficiente distribuição homogênea de reforço na matriz, reduzindo a chance de formação de fase tripla, minimizando a reação interfacial, minimizando a segregação do reforço utilizado, melhorando a ligação interfacial e a fabricação do produto na sua forma final, sem a necessidade de processos posteriores [21, 25, 26].

2.2 Metalurgia do Pó

A metalurgia do pó é um processo que está com seu mercado em crescimento constante. Dados de 2010 mostram que este processo alcançou 2 bilhões de dólares com a venda de produtos obtidos por metalurgia do pó [27]. A indústria vem abrindo cada vez mais espaço para peças sinterizadas, utilizadas em automóveis, eletrodomésticos, telefones celulares, instrumentos cirúrgicos, armamentos, artigos esportivos, ferramentas entre outros. A metalurgia do pó está difundida nas mais diferentes áreas, mas a indústria automobilística continua sendo o maior consumidor desta tecnologia. A Tabela 1 demonstra a energia necessária para fabricar o quilo de peça acabada em vários processos de fabricação, assim como a quantidade de matéria prima utilizada pelo processo, onde se evidencia a maior economia de energia e menor desperdício de matéria prima no processo de metalurgia do pó (M/P), o que justifica a demanda de produtos e o crescimento deste processo [28].

Tabela 1 – Energia e a matéria prima utilizada em vários processos de fabricação [29]

Processo de Fabricação	Utilização de Matéria Prima (%)	Energia necessária para produzir 1kg de peça acabada (J)
Fundição	90	30000-38000
Metalurgia do Pó	95	29000
Extrusão a frio e a morno	85	41000
Forjamento a quente em matriz fechada	75-80	46000-49000
Processos de usinagem	40-50	66000-82000

A metalurgia do pó convencional consiste, basicamente, na compactação de pós metálicos/cerâmicos em matrizes com a forma do produto desejado. As peças obtidas são encaminhadas para a etapa de sinterização, em fornos, onde as partículas destes pós se unem devido à ação da temperatura. Nesta etapa ocorre uma contração do volume das peças, atingindo as formas e dimensões finais projetadas [30].

Este processo possui um vasto campo de aplicações que inclui, por exemplo, a fabricação de peças para componentes automotivos, eletrodomésticos, ferramentas de corte, ferramentas elétricas, fabricação de braquets para aparelhos dentários entre outros [31].

Além disto, o processo tem como característica o baixo custo para produção de peças em larga escala e um baixo impacto ambiental quando comparado com as tecnologias concorrentes, pois exige um menor consumo de energia de transformação e possibilita um alto aproveitamento da matéria prima. Possui ainda como característica a obtenção, em grande parte dos casos, de peças com as tolerâncias finais necessárias para aplicação direta no produto do cliente, o que acaba por reduzir os custos da cadeia produtiva [29].

Peças fabricadas por metalurgia do pó possuem certa porosidade, que pode ser controlada através de fatores como pressão de compactação, temperatura e tempo de sinterização, tamanho e forma das partículas do pó, entre outros. A peça pronta apresenta bom acabamento superficial e adequadas tolerâncias dimensionais [32].

Dentre as etapas fundamentais deste processo podem-se destacar as principais:

Obtenção dos pós: Atualmente existem vários processos de fabricação de pó como, por exemplo, atomização a água e gás, moagem, mecanossíntese, eletrólise e métodos químicos, incluindo a redução de óxidos, entre outros [30, 33].

Mistura: Nesta etapa se efetua a mistura de vários pós para produzir a liga desejada e promover a homogeneização da matéria prima. Esta mistura pode ser realizadas em misturadores próprios para a metalurgia do pó, ou ainda em moinho de esferas. Também são adicionados lubrificantes que possuem a finalidade de diminuir o atrito das partículas de pó entre si e o atrito destas com o ferramental de compactação [34].

Compactação do pó: É a conformação dos pós pela aplicação de pressão uniaxial ou biaxial em ferramentas apropriadas, geralmente, em temperatura ambiente. Em muitas aplicações onde as propriedades mecânicas são um diferencial, necessita-se um aumento da densidade destas peças através de maior pressão de compactação [34].

Sinterização: Esta etapa confere um tratamento térmico na peça compactada, que visa conferir o formato final desejado atingindo propriedades químicas e mecânicas através da ligação atômica entre as partículas vizinhas. Este processo ocorre a uma temperatura

abaixo da temperatura de fusão do metal base, sob condições controladas de temperatura, tempo e atmosfera [35].

Pode ser agregada uma série de outras operações adicionais de fabricação e/ou acabamento que melhoram as propriedades e precisão dimensional do produto sinterizado ou ainda impõem características particulares para aplicações específicas. A recompressão, resinterização, forjamento, calibragem, infiltração metálica, tratamento térmico, usinagem, tamboreamento, entre outras. Estas são algumas etapas que podem ser agregadas no processo produtivo [36]. A Figura 3 apresenta de maneira simplificada, a rota da metalurgia do pó.

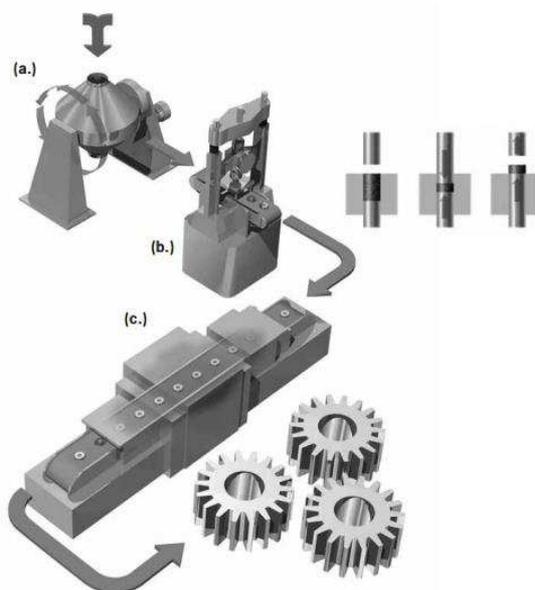


Figura 3 – Rota Simplificada da M/P : (a) mistura; (b) compactação; (c) sinterização [37]

A metalurgia do pó utiliza como matéria prima os pós-metálicos e não metálicos, tendo suas características influenciadas pelo comportamento dos pós durante o processamento e assim influenciando diretamente nas qualidades finais das peças sinterizadas [38].

As características, que devem ser conhecidas e controladas, são:

- Distribuição e tamanho da partícula: Existe grande variação no tamanho de partículas, normalmente entre 400 a 0,1 micrometros, portanto é raro encontrar partículas de tamanho uniforme. Devido a este fato, é necessário determinar uma distribuição quantitativa de partículas dentre as diversas dimensões, o que é realizado, normalmente, pelo processo de peneiramento [38].

- Formato da partícula: Como existem diversos processos de fabricação dos pós, existe uma variação grande nas geometrias. Elas podem ser esféricas, esferóides ou em gotas, esponjosa irregular, dendrítica, angular, entre outras, menos comuns [38].

Na Figura 4 podem-se observar algumas formas geométricas de partículas.

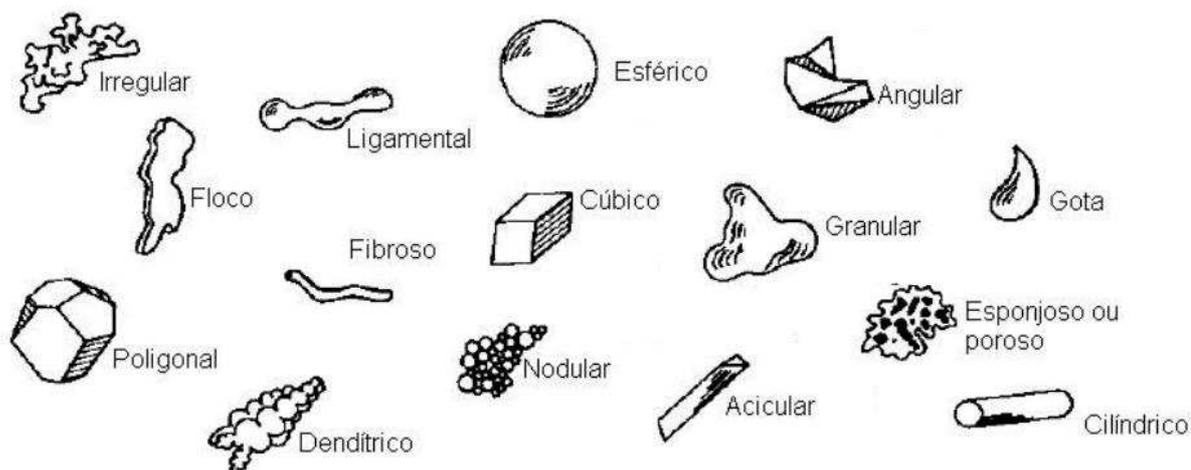


Figura 4 – Formas geométricas de partículas [39]

- Porosidade: Os poros afetam características dos pós, como a densidade aparente e a compressibilidade, mas também na porosidade da peça acabada. Consideram-se dois tipos de porosidade: porosidade tipo esponjosa, caracterizada por poros que não estão interligados entre si e a porosidade em que os poros estão interligados. Neste caso, mesmo quando os poros estiverem ligados com a superfície, verifica-se um aumento da superfície específica das partículas, além de ficar facilitada a absorção de gases durante o seu processamento [38].

- Estrutura da partícula: Partículas de apenas um grão, ou formadas por poucos grãos não promover a compressibilidade do pó, diferente de partículas formadas por vários grãos finos [38].

- Superfície específica: O conhecimento desta característica é de grande importância no processo, pois com isso sabe-se o número de pontos de contato entre as partículas na sinterização [38].

- Densidade aparente: É a relação de gramas por cm^3 . Esta característica é importante devido ao enchimento das matrizes de compressão ser realizado por volume. Desta maneira, esta característica torna-se fundamental na escolha do tipo de pó para o processo [38].

- Velocidade de escoamento: É a capacidade que o pó possui de fluir, sob condições atmosféricas, sobre os planos inclinados no interior da cavidade da matriz, dentro de um determinado intervalo de tempo [38].
- Compressibilidade: É a capacidade que o pó possui de ser conformado em briquete de um volume predeterminado a uma dada pressão, ou, relação entre densidade aparente do briquete simplesmente comprimido (chamada densidade verde) e a densidade aparente do pó [38].
- Composição química e pureza: O objetivo principal de conhecer a sua composição química ou pureza consiste em determinar as impurezas do pó, metálicas ou não metálicas, devido a estas impurezas poderem afetar as condições de compactação e de sinterização [38].

2.2.1. Obtenção de Pós Metálicos

Existem vários processos para a obtenção do pó metálico, a escolha do processo vai depender do conjunto de propriedades do material e das características que se deseja para o pó, em função da aplicação que será submetido.

Os principais métodos de obtenção são:

- **Métodos mecânicos (quebra e moagem):** indicados para materiais frágeis ou fragilizados por algum processo anterior. Consistem em fragmentar o material com o auxílio de martelos ou moinhos até um determinado tamanho de partícula. Os moinhos mais comuns são de bolas, conforme mostrado na Figura 5, vibratórios e de atrito [39].



Figura 5 – Moinho de bolas IAE – Instituto de Aeronáutica e Espaço [40]

- **Fluxo frio:** aumenta a fragilidade dos metais em temperaturas baixas para sua transformação em um pó grosseiro, que é arrastado por um fluxo de gás sob alta pressão até uma câmara a vácuo. O pó em alta velocidade colide com um alvo instalado dentro da câmara e como se encontra relativamente frágil devido à baixa temperatura, quebra-se em partículas menores. O pó que já apresenta tamanho pequeno é separado da fração gasosa que novamente é reconduzida ao processo [39].

- **Atomização:** neste processo o metal fundido é vazado através de um orifício formando um filete líquido que é atacado por jatos de ar (processo R-Z / *Roheisen-Zunder*), gás (processo ASEA-STORA que utiliza o argônio e o nitrogênio), ou processo CSC / *CentrifugalShotCasting*) ou água. Esses jatos provocam a pulverização do filete e seu imediato resfriamento. O pó recolhido é reduzido e peneirado, estando pronto para ser utilizado. A atomização a água normalmente conduz a partículas irregulares e angulosas, enquanto que a atomização ao ar produz partículas mais esferoidais [39]. O tamanho e a forma das partículas variam em função de vários parâmetros, entre os quais se destacam: a espessura do filete de material fundido, a pressão do fluido, a geometria do conjunto de pulverização e evidentemente, o tipo de atomização.

- **Processo de redução química:** ocorre a redução de compostos de metais com agentes redutores gasosos ou sólidos. Este processo é um dos mais significativos para obtenção de pós metálicos. Os agentes redutores mais utilizados são o carbono e o hidrogênio. A redução com o carbono é utilizada apenas para elementos metálicos que não formam carbonetos muito estáveis, a não ser que se deseje obter pó como produto final. A redução com carbono é principalmente utilizada para o ferro, como é evidenciado pelo processo *Höganäs* [39].

- **Processo de eletrólise:** os pós produzidos por esse processo são de extrema pureza, possuem baixa densidade aparente e têm grãos de estrutura micrográfica nitidamente dendrítica. Após a eletrólise os pós são retirados dos tanques sob a forma de uma lama, que então é seca e classificada por peneiramento [39].

2.2.2 Sinterização

Pode-se definir a sinterização como um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas em contato mútuo, adquira resistência mecânica. A força motora é o decréscimo da energia livre associado à superfície do conjunto de partículas, obtido pela diminuição da superfície total do sistema [41]. Na maioria dos casos,

isto traz como consequência a eliminação do espaço vazio existente entre as partículas, resultando em um corpo rígido e denso [42].

A resistência mecânica obtida pela estrutura de uma peça durante o processo da metalurgia do pó é resultante da sinterização. Por aquecimento e em temperaturas abaixo do ponto de fusão do material base, ocorre a união das partículas de forma coerente, atingindo como resultado uma massa sólida. A porosidade é eliminada enquanto as partículas se unem durante o processo de sinterização à alta temperatura, normalmente, a temperatura de sinterização encontra-se entre a ordem de $2/3$ a $3/4$ da temperatura de fusão da liga considerada. Por exemplo, no caso das ligas ferrosas, a temperatura de sinterização varia de $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [38].

As partículas dos pós desenvolvem ligações metalúrgicas e a estrutura dos pós densificam-se sob a ação do calor, o que confere uma melhor resistência mecânica e a uma baixa energia do sistema [43].

Na Figura 6 pode-se observar que o processo de sinterização é dividido em três zonas distintas, na primeira etapa a peça ainda verde entra na denominada zona de pré aquecimento, passando pelas fases de sinterização na segunda câmara onde ocorre a ligação metalúrgica das partículas de pó e, por fim, a última zona de resfriamento onde a micro estrutura do material é formada.

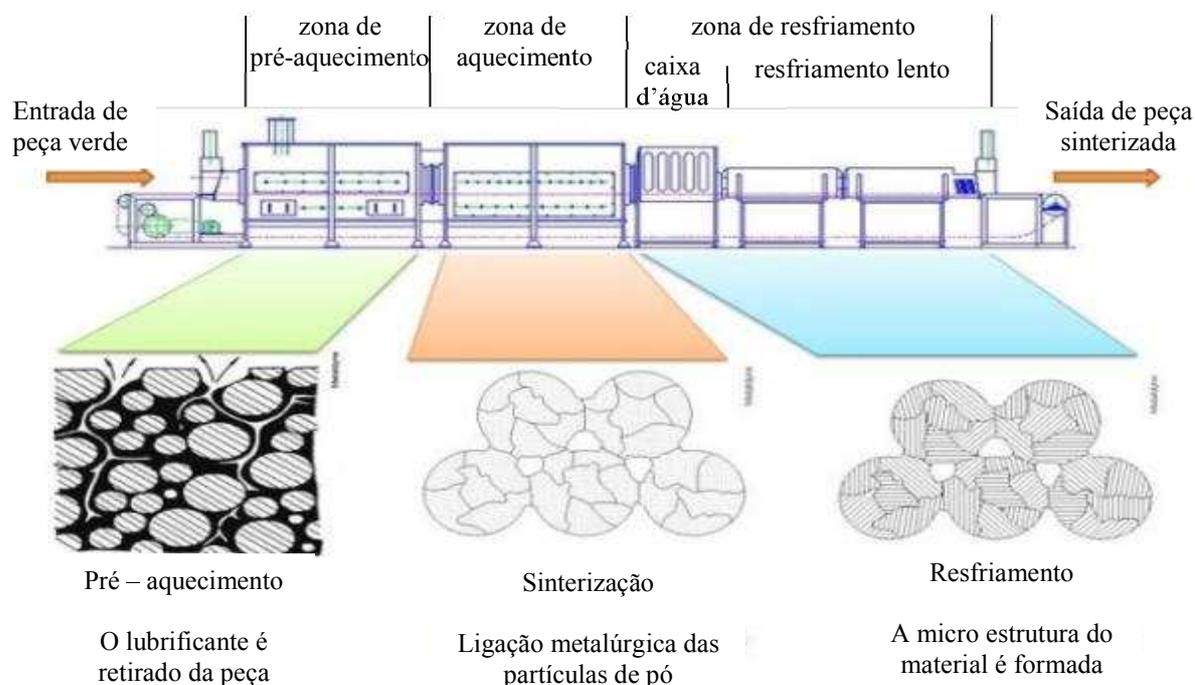


Figura 6 – Etapas do processo de sinterização convencional [31]

2.2.3 Mecanismos da Sinterização

A sinterização ocorre no estado sólido pela movimentação de átomos para formar as ligações entre as partículas [44]. Durante a sinterização, diferentes mecanismos de movimentação atômica atuam no material:

- **Difusão Superficial:** Os átomos movem-se ao longo da superfície das partículas. Provavelmente a difusão superficial ocorre durante todo o processo de sinterização, mesmo em baixas temperaturas, especialmente em pós muito finos e no primeiro estágio da sinterização quanto a superfície específica ainda é muito alta. Durante os estágios intermediário e final de sinterização a difusão superficial necessita de pouca energia de ativação, sendo o mecanismo dominante em baixas temperaturas [45].

- **Difusão em contorno de grão:** os átomos movimentam-se ao longo dos contornos de grãos. Também a difusão em contorno de grão é um mecanismo de difusão presente já em baixas temperaturas. Sua energia de ativação fica entre a difusão superficial e a difusão volumétrica. A difusividade atômica depende do ângulo entre grãos adjacentes, entretanto os contornos de grão não são uniformes, assim sua energia de ativação é estimativa. Os contornos de grão são caminhos para a difusão, sendo importantes para a retração dos poros durante a sinterização [45].

O aquecimento muito rápido pode provocar uma separação dos contornos de grão dos poros resultando em menor densificação. O balanço entre tais efeitos pode ser obtido por taxas controladas de aquecimento.

- **Difusão Volumétrica:** Os átomos deslocam-se dentro do reticulado. A difusão volumétrica por vacâncias é dominante nesse mecanismo, que apresenta alta energia de ativação. Gradientes de vacâncias existem entre o retículo não distorcido e as superfícies encurvadas como as bordas dos poros. Também entre superfícies tendo diferentes curvaturas e entre partes distorcidas e não distorcidas do reticulado [46], ocasionando o fluxo difusional.

- **Evaporação-condensação:** Os átomos movimentam-se através dos poros. Devido às baixas pressões de vapor dos materiais produzidos por metalurgia do pó, esse mecanismo não é dominante na maioria dos processos convencionais conhecidos [46].

2.2.4 Sinterização com atmosfera controlada

As possíveis reações químicas que podem ocorrer entre a amostra e a peça a ser sinterizada, em toda a gama de temperatura e pressões devem ser consideradas para definição da atmosfera de sinterização a ser empregada [47].

Para a sinterização de materiais como o titânio usam-se gases inertes, que criam uma atmosfera protetora sobre este, sem que ocorra nenhuma reação (desde que este possua pureza adequada). O hidrogênio é outro gás utilizado para materiais com afinidade ao oxigênio, pois este cria uma atmosfera redutora sobre a camada de óxido, facilitando a adesão e a máxima integridade da peça sinterizada. [47].

As atmosferas empregadas na operação de sinterização possuem como objetivos principais:

- Impedir a entrada de ar no forno;
- Facilitar a eliminação de lubrificante nas peças compactadas;
- Sinterizar;
- Reduzir óxidos superficiais;
- Controlar o teor de carbono na superfície e no núcleo das peças (carbanetando ou descarbanetando);
- Transmitir de modo uniforme e eficiente o calor.

As atmosferas convencionais utilizadas na operação de sinterização são as seguintes: gás endotérmico, gás exotérmico, amônia dissociada, hidrogênio e vácuo (ou falta de atmosfera) [38].

2.3 Cinzas de carvão produzidas em termoeletricas

Usinas termoeletricas convencionais utilizam combustíveis fósseis para geração de energia elétrica, como o carvão, gás natural e óleo diesel. A quantidade de combustível que a usina utilizará vai depender da eficiência das turbinas, que é conhecida pelo *Heat Rate* (taxa de calor), definido como o número de Btus (Unidades Térmicas Britânicas) do combustível necessário para gerar um megawatt-hora (MWh) de eletricidade [48].

As usinas termoeletricas que estão entre os maiores geradores de resíduos sólidos no mundo utilizam carvão como combustível. Relatos na literatura mostram que apenas uma parte das cinzas são reutilizadas [48].

O principal combustível das usinas termoeletricas, e também a maior fonte de resíduos sólidos gerados, é o carvão mineral. Este combustível é formado pela

decomposição de matéria orgânica durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. O carvão mineral é composto por átomos de carbono, oxigênio, nitrogênio, enxofre, elementos rochosos (como silito, arenito, diamictitos e folhelhos) e minerais, como a pirita por exemplo. Este material é muito utilizado na indústria siderúrgica e na produção de energia elétrica. O carvão mineral foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas em larga escala pelo homem e a fonte mais utilizada para geração de energia elétrica no mundo, de acordo com dados da *International Energy Agency* (IEA). O carvão corresponde por 41% da produção total de energia elétrica no mundo. Na produção global de energia primária, que considera outros usos além da produção de energia elétrica, este mineral corresponde à 26%. A IEA também projeta que o minério manterá posição semelhante nos próximos 20 anos [49].

Uma grande restrição para a utilização do carvão é o forte impacto socioambiental provocado em todas as etapas do processo de sua produção e de seu consumo, mesmo quando está sendo extraído provoca a degradação das áreas de mineração. A combustão deste minério é responsável por emissões de gás carbônico (CO₂). Projetos de mitigação e investimentos em tecnologia *Clean Coal Technologies* (tecnologias de carvão não poluente), estão sempre sendo desenvolvidos para atenuar estes problemas [50].

O consumo do carvão mineral na atualidade está bem consolidado devido à vasta disponibilidade de reservas, mas também pela qualidade do carvão, que é medida pela capacidade de produção de calor. Esta capacidade é expressa em quilocaloria obtida por quilo do combustível (kcal/kg) e, por sua vez, é favorecida pelo teor de carbono e hidrogênio e prejudicada pela quantidade de impurezas como elementos rochosos e outros minerais.

O poder calorífico e a quantidade de impurezas contidas no carvão mineral variam de acordo com a categoria de classificação: alta qualidade (ou hulha, subdividida nos tipos betuminoso e antracito) e baixa qualidade (linhito e sub-betuminoso). A Figura 7 mostra que 53% das reservas mundiais de carvão mineral são compostas por carvão com alto teor de carbono e 47% com baixo teor de carbono. A produção e o consumo mundial concentram-se nos carvões tipos betuminoso/sub-betuminoso e linhito. Os carvões betuminoso e sub-betuminoso possuem maior valor térmico e são muito comercializados no mercado internacional. O carvão do tipo sub-betuminoso é utilizado na geração de energia elétrica.

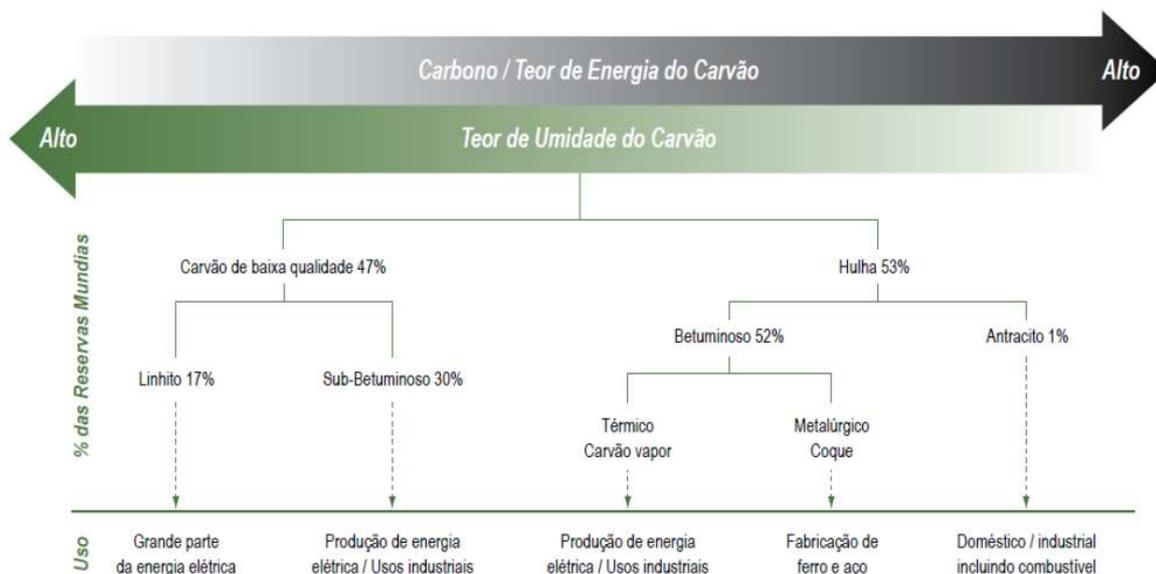


Figura 7 – Tipos de carvão, reservas e usos [50]

O maior produtor e consumidor mundial de carvão na atualidade é a China. Entre os maiores produtores de carvão figuram os seguintes países: Estados Unidos, Índia e Austrália. A Rússia é o segundo maior em termos de reservas, mas ocupa 6º lugar quando se trata de produção e do consumo. Este desempenho é o reflexo pela utilização majoritária do gás natural neste país.

O Brasil, região de Santa Catarina, possui reservas de carvão do tipo sub-betuminoso que apresentam características como teores elevados de pirita (FeS_2), metais tóxicos e alta geração de cinzas, resultantes da queima deste minério [51]. As maiores reservas encontram-se no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Já as menores jazidas situam-se no Paraná e São Paulo. As reservas brasileiras configuram o 10º lugar em um *ranking* mundial podendo alcançar até 32 bilhões de toneladas, o que corresponde menos de 1% das reservas totais no mundo. A Associação Brasileira do Carvão Mineral (ABCM) calcula que as reservas de carvão conhecidas poderiam gerar 17 mil megawatts (MW) de energia.

O Carvão mineral no Brasil representa cerca de 1,5% da matriz da energia elétrica. No ano de 2007 foram produzidos no país 435,68 TWh e apenas 7,9 TWh foram gerados utilizando o carvão em usinas termoelétricas no país. As áreas com usinas termoelétricas e com proximidades às áreas de extração do minério, assim como potência e o destino da energia gerada estão expressas na Tabela 2.

Tabela 2 – Centrais termoelétricas a carvão mineral em operação no Brasil [52]

Usina	Potência (kW)	Destino da Energia	Município	Proprietário
Charqueadas	72.000	PIE*	Charqueadas - RS	Tractebel Energia S/A.
Figueira	160.250	SP**	Figueira - PR	Copel Geração S/A.
Jorge Lacerda I e II	232.000	PIE	Capivari de Baixo - SC	Tractebel Energia S/A.
Jorge Lacerda III	262.000	PIE	Capivari de Baixo - SC	Tractebel Energia S/A.
Jorge Lacerda IV	363.000	PIE	Capivari de Baixo - SC	Tractebel Energia S/A.
Presidente Médici A, B e C	796.000	SP	Candiota - RS	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica
São Jerônimo	20.000	SP	São Jerônimo - RS	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica

* Destino de energia para Produção Independente

** Destino de energia para Serviço Público

Estas usinas, dependendo do processo utilizado, ao efetuarem a queima do carvão mineral geram resíduos, como cinzas leves, cinzas pesadas e cinzas grossas. O conhecimento das propriedades dos carvões e de seus resíduos é muito importante na hora de decidir o seu uso industrial. Planejar o local para a deposição dos resíduos gerados e não utilizados evita contaminação da água e do solo, além dos muitos outros impactos ambientais possíveis [51, 9].

2.3.1 Cinzas Leves

As Cinzas leves, também chamadas de cinzas volantes ou cinzas secas são constituídas por partículas extremamente finas, com dimensão inferior a 0,15mm. Este material é transportado pelo fluxo dos gases da combustão do carvão mineral em termoelétrica e coletado nos ciclones mecânicos ou precipitadores eletrostáticos ou, ainda, lançado na atmosfera. As cinzas volantes são compostas entre 60 e 90% de material vítreo, sendo geralmente 30 a 60% de SiO_2 , 10 a 20% de Al_2O_3 , 5 a 10% de Fe_2O_3 , 5 a 10% de MgO e 2 a 4% de CaO , entre outros compostos [53].

No processo de combustão de carvão em termoelétricas, estes minerais são parcialmente fundidos e formam partículas de cinzas leves nas quais as fases cristalinas, como quartzo e mulita, permanecem no núcleo, enquanto os aluminossilicatos ($\text{Al}_2\text{O}_5\text{Si}$) em fase vítrea cobrem a superfície [54, 55].

As cinzas volantes são compostas predominantemente de partículas pequenas, vítreas e ocas, com tamanhos de 0,01 a 100 μm [56]. O tamanho das partículas das cinzas é dependente do tipo de sistemas de filtros utilizados na usina termoelétrica [57].

2.3.2 Classificação das cinzas leves

Existem duas classificações de acordo com o tipo de carvão para as cinzas volantes geradas. A cinza volante do tipo C origina-se do carvão dos tipos linhito e sub-betuminoso e apresenta cerca de 70% dos materiais sílica, alumina e óxido de ferro e cerca de 30% de óxido de cálcio, sendo esta a mais rica deste material. A cinza do tipo F origina-se do carvão dos tipos betuminoso e antracito e tem cerca 80% dos óxidos mencionados e 20% de óxido de cálcio [58, 59]. A cinza do tipo F exibe propriedades pozolânicas e por isso é utilizada em indústrias de cimentos.

2.3.3 Aplicações das cinzas

A cinza volante com baixo percentual de carbono, é utilizada como aditivo mineral na produção de cimento Portland [60]. As vantagens da adição de cinza volante aos concretos devem-se ao incremento da impermeabilidade e, conseqüentemente, da durabilidade do material [61]. O atrativo industrial do uso de cinza para substituir parte do clínquer na produção do cimento composto é um modo seguro e barato de destinação final das cinzas, contribuindo para a conservação da energia utilizada na fabricação de cimento e para aprimorar a gestão de recursos minerais como o calcário e a argila, cuja exploração agride o meio ambiente [62].

Em 1992, foram geradas 459 milhões de toneladas de cinzas de carvão e apenas 33,3% foram reutilizadas pela indústria de cimentos [63]. Estima-se que 600 milhões de toneladas de cinzas volantes foram produzidas no mundo em 2000 [64]. Os Estados Unidos produzem anualmente cerca de 63 milhões de toneladas de cinzas volantes, sendo que apenas 30% são reutilizadas e o restante é disposto em aterros ou represado em superfície [65]. Em 2004 o Canadá produziu 4,7 milhões de toneladas de cinzas volantes e apenas 31% foram usados na indústria de cimentos [66]. Na Índia, a produção de cinzas leves entre 2000 e 2001 foi de 150 milhões de toneladas [67] e seu aproveitamento na construção civil foi menor que 15% [68]. Em 2002, a produção de cinzas na China foi de 150 milhões de toneladas e cerca de 100 milhões de toneladas foram utilizadas em concreto [69]. No ano de 2001, o Japão gerou 8,8 milhões de toneladas de cinzas, das quais 1,6 milhões foram estocadas sem utilização [70]. A Alemanha produz anualmente 4,3 milhões de toneladas de cinzas volantes e utiliza quase 100% em indústrias de cimento e concreto, além de outros materiais de construção, produtos cerâmicos, alvenaria, construção de estradas e outras aplicações [69].

No Brasil, estima-se que se produzam anualmente cerca de três milhões de toneladas de cinzas nas usinas termoelétricas [9]. A cinza leve produzida na Usina Termoelétrica Jorge Lacerda – Tubarão/SC é reaproveitada pela indústria cimenteira [70]. Estima-se que 50% da cinza volante são utilizados pela indústria cimenteira e uma parcela complementar, não determinada, pelas centrais de concreto [71]. Embora a indústria da construção civil utilize uma parte das cinzas leves geradas em termoelétricas, continua existindo uma quantidade considerável de cinzas que é disposta em aterros ou a céu aberto. Por isso, novas aplicações potenciais foram desenvolvidas ou estão em desenvolvimento, por exemplo:

- síntese de zeólita a partir de cinzas volantes [56, 72, 73, 74, 75, 76]
- aproveitamento da cinza de carvão mineral na agricultura [77];
- fabricação de blocos e tijolos [60];
- recuperação de urânio e tório por meio do uso de cinza volante [78];
- zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão foram usadas, com sucesso, como fonte de nutrientes para o cultivo de aveia [56];
- uso de cinzas volantes zeolitizadas em chapas resistentes ao fogo [79];
- possibilidade de recuperação de alumina das cinzas volantes [80].
- A utilização de cinzas volantes como reforço mecânico no compósito ternário de FeCuC, estudo para aplicação em buchas autolubrificantes [81];
- Utilização de cinzas como reforço em componentes de ferro obtidos por M/P [5];
- Utilização para melhorar as propriedades físicas de componentes de cobre [82]
- Utilização de cinzas leves como base para geopolímeros aplicados em cimentos comuns, melhorando as propriedades mecânicas do concreto. [83, 84]

A empresa japonesa *Chubu Electric Power Company* utiliza as cinzas volantes de carvão para a manufatura de diversos produtos, por exemplo:

- Plash – matéria-prima para a produção de plástico, produzida adicionando-se cinzas volantes ao polipropileno;
- Circulash – zeólita artificial de cinzas volantes, utilizada como agente desodorizador e purificador de ar.

2.4 Cobre

O cobre é um dos metais mais utilizados na atualidade, sendo puro ou através de suas ligas, em diversas aplicações que exijam elevada condutividade térmica e elétrica, combinada com sua resistência à corrosão apreciável. Mesmo tendo resistência mecânica

baixa, comparada a outros metais, as ligas de cobre são amplamente utilizadas em aplicações tecnológicas que vão desde componentes elétricos em relés convencionais até absorvedores de elétrons e fótons em aceleradores síncrotrons [85,86].

O cobre é um elemento metálico com número atômico 29 e peso atômico 63,57. O seu símbolo químico é Cu (do latim *cuprum*), e suas valências são +1 e +2. Não é magnético e pode ser utilizado puro ou em ligas com outros metais que lhe conferem excelentes propriedades químicas e físicas. Possui densidade 8,9 g/cm³ e sua temperatura de fusão é de 1083 °C. Possui dois isótopos estáveis e cristaliza no sistema cúbico [17].

Não reage com o ar seco, mas quando o ar está úmido e contém dióxido de carbono reage formando uma camada protetora esverdeada de carbonato básico.

2.4.1 Classificação do cobre

Existem vários tipos de liga de cobre. Os elementos de liga são adicionados ao cobre com o intuito de melhorar a resistência, a ductilidade e a estabilidade térmica, sem causar prejuízos à formabilidade, condutividades elétrica e térmica e resistência à corrosão característicos deste metal. As ligas de cobre apresentam excelente ductilidade a quente e a frio, ainda que inferiores às do metal no seu estado mais puro [87]. As grandes ligas de cobre são divididas nos grupos listados a seguir:

- Cobre comercialmente puro;
- Ligas de alto teor de cobre;
- Latões;
- Bronzes;
- Ligas de cobre-níquel;
- Ligas de cobre-níquel-zinco;

As ligas de cobre podem ser encontradas como produtos trabalhados mecanicamente, fundidos e sinterizados. Entre os produtos trabalhados estão os planos (placas, chapas, tiras e folhas), arames e tubos (exemplificados na Figura 8), fio-máquinas, perfis extrudados e forjados [88]. Já os produtos fundidos podem ser produzidos por vários métodos, tais como em areia, contínua, centrífuga, sob pressão, cera perdida, gesso e coquilha.

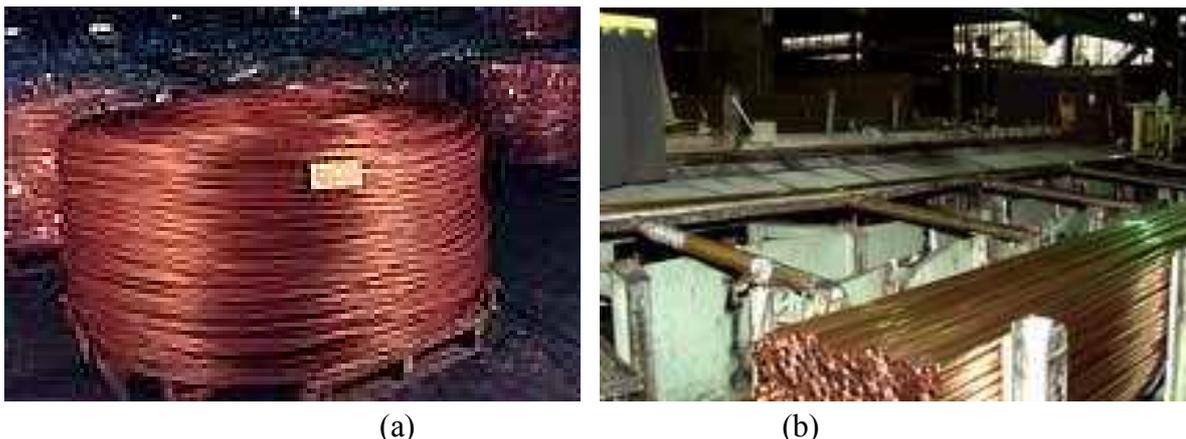


Figura 8 – Bobinas (a) e tubos de cobre (b) [88]

O sistema de classificação unificado (UNS) divide o cobre em dois tipos: ligas trabalhadas e ligas fundidas.

2.4.2 Aplicações do cobre

Quando descoberto, o cobre era usado para a fabricação de armas, ferramentas e utensílios gerais. Com o desenvolvimento industrial, suas características permitiram as mais diversificadas aplicações [17].

A maior utilização do cobre na atualidade é para transmissão elétrica e para a indústria de telefonia. Para o aproveitamento máximo de suas propriedades elétricas recomenda-se usá-lo em estado puro. Com necessidade de melhorar as propriedades mecânicas são utilizadas ligas formadas com zinco, estanho, chumbo, níquel, entre outros. [89].

A maior parte dos processos industriais utiliza alguma liga de cobre. O latão (liga de cobre e zinco) é uma das principais ligas de cobre, o que o torna facilmente moldado e trabalhado. O bronze (liga de cobre e estanho) tem boas propriedades para fundição. As ligas com alumínio ou níquel resistem bem à oxidação e a alguns agentes corrosivos. [17].

Para a utilização do cobre em aplicações estruturais é necessário que o material possua elevada resistência mecânica, propriedade que é atingida com a união de outros elementos em suas ligas. Porém no caso do cobre, quando este é submetido a processos de união a outros materiais em altas temperaturas, esta propriedade fica ainda mais comprometida devido à recristalização e crescimento de grãos do cobre que ocorrem em temperaturas relativamente baixas, isto é, abaixo da temperatura de fusão das ligas de adição [1].

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

A metodologia utilizada na execução desta dissertação seguiu o processo convencional da metalurgia do pó e apresentada no fluxograma representado na Figura 09 que segue.

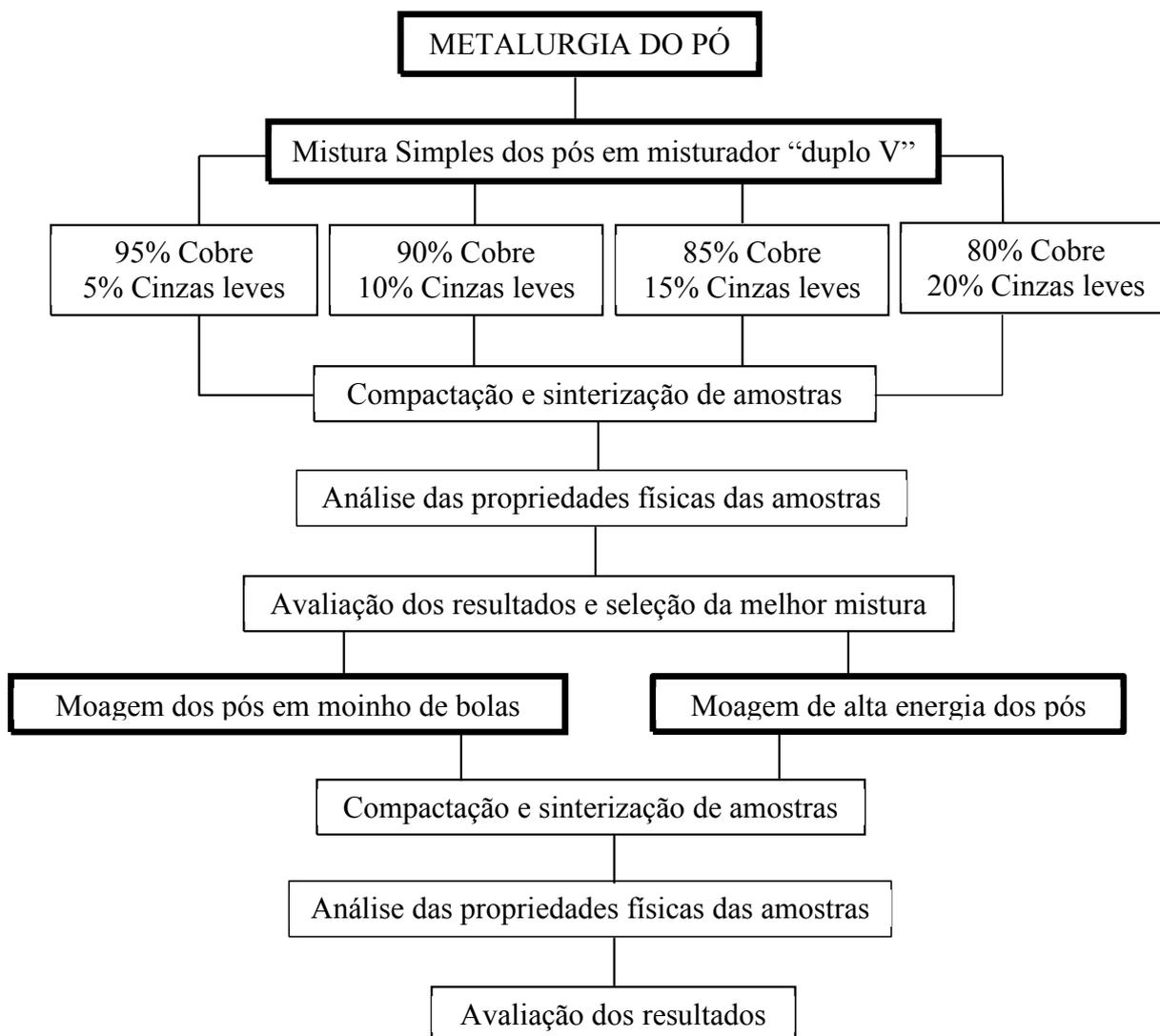


Figura 9 – Metodologia utilizada na dissertação

3.1 Materiais utilizados

Para a realização desta pesquisa, utilizou-se dois materiais específicos: cobre eletrolítico dendrítico e cinzas leves obtidas pela queima de carvão mineral em termoelétrica.

Foi utilizado nesta pesquisa o cobre eletrolítico dendrítico PCED-030 com grau de pureza entre 99,50% à 99,99%, fabricado pela empresa Brutt Indústria Metalúrgica, situada

em Cachoeirinha-RS e doado para o LdTM realizar pesquisas. As características técnicas do cobre eletrolítico dendrítico estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características técnicas do cobre eletrolítico dendrítico [90].

Cobre dendrítico (código)	Grau de pureza (%)	Distribuição granulométrica (malha: Mesh/ μm)			
		+100/150	+200/75	+325/45	-325/45
PCED-030	99,5 – 99,99	0%	0%	Máx. 2%	98% a 100%

As cinzas leves utilizadas nesta pesquisa são oriundas da queima de carvão mineral na empresa Tractebel Energia, situada em Florianópolis-SC. A distribuição granulométrica das cinzas leves apresentou 71% das partículas com diâmetro médio inferior a $70\mu\text{m}$ e 29% com diâmetro médio de até $300\mu\text{m}$. A composição química obtida por fluorescência de raios-x está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise por perda ao fogo em espectrômetro por fluorescência de raios-x.

Óxido	Teor (% em massa)
SiO_2	62,5
Al_2O_3	23,8
Fe_2O_3	5,27
CaCO_3	2,87
K_2O	2,72
CaO	1,37
TiO_2	1,23
Outros	1,11

3.2 Equipamentos e ferramental utilizados

As misturas iniciais do pó de cobre com as cinzas leves foram realizadas em misturador duplo “V”, próprio para a metalurgia do pó, exibido na Figura 10.



Figura 10 – Misturador de pós

Após a mistura dos pós, utilizou-se uma matriz de compactação, demonstrada na Figura 11, que foi acoplada em uma prensa para efetuar a compactação dos corpos de prova.

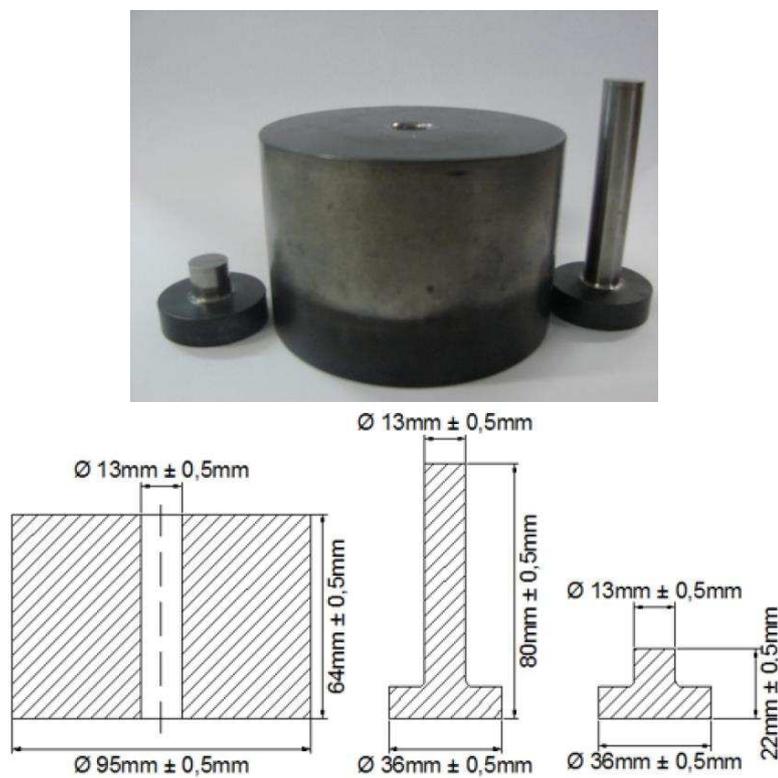


Figura 11 – Matriz de compactação

O Equipamento utilizado para a aplicação das cargas de compressão na matriz foi uma prensa hidráulica manual de 30 toneladas da marca BOVENAU, exibida na Figura 12.



Figura 12 – Prensa Hidráulica BOVENAU 30 toneladas.

Após a compactação, as amostras foram encaminhadas para a sinterização realizada em um forno da “Sanchis Fornos Elétricos”, demonstrado na Figura 13, do Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS, no Centro de Tecnologia da Universidade.



Figura 13 – Forno de Sinterização.

As amostras sinterizadas foram submetidas ao procedimento de lixamento, realizado em politriz metalográfica, conforme demonstrado na Figura 14, onde foram utilizadas lixas de papel com abrasivo tipo SiC com granulometrias de número 120, 280, 320, 400, 600 e 1200.



Figura 14 – Politriz AROTEC AROPOL 2V

As amostras foram submetidas ao polimento com pano de feltro e com abrasivo de óxido de alumínio para deixar a superfície das amostras espelhadas.

Para a realização da metalografia das amostras foi utilizado o microscópio óptico Olympus GX51F, apresentado pela Figura 15.



Figura 15 – Microscópio Olympus GX51F.

Foi realizado o teste de Microdureza em todas as amostras no Microdurômetro ISH-TDV1 000, demonstrado pela Figura 16.



Figura 16 – Microdurômetro ISH-TDV1 000

Na segunda etapa deste estudo foi realizado a moagem dos pós de cobre com cinzas leves através de um moinho de bolas, demonstrado pela Figura 17.



Figura 17 – Moinho de Bolas

Na última etapa do trabalho efetuou-se a moagem de alta energia dos pós de cobre com cinzas leves em moinho planetário RETSCH - PM Grind Control 500, exibido pela Figura 18.



Figura 18 – Moinho planetário RETSCH - PM Grind Control 500

3.3 Obtenção de corpos de prova por M/P

A obtenção dos corpos de prova partiram de 3 métodos diferentes para a obtenção do compósito com os pós de cobre e cinzas leves, sendo:

- Mistura simples dos pós de cobre com cinzas leves em misturador duplo “V”;
- Moagem dos pós de cobre e cinzas leves em moinho de bolas;
- Moagem de alta energia dos pós de cobre e cinzas leves em moinho planetário;

3.3.1 Mistura simples de pós de cobre com cinzas leves

As misturas de cobre com diferentes percentuais de cinzas leves de carvão foram realizadas utilizando uma balança analítica onde foi medida a massa dos pós para garantir as proporções adequadas para o compósito.

Nas misturas de cobre com cinzas leves, acrescentou-se 1,5% de parafina (material que atua como lubrificante durante a compactação das amostras e para melhor extraí-las da matriz) [38].

Com a mistura pronta, o primeiro resultado obtido foi o da densidade aparente, que é a densidade medida do material que preenche um recipiente de volume conhecido, através de sua escoabilidade. Este procedimento consiste em medir a densidade do material sem que haja pressão alguma aplicada. Para isto o material é escoado dentro de um recipiente com volume conhecido, após o preenchimento completo do recipiente é feita a medição da massa do material que foi nele depositado.

A densidade aparente das misturas formuladas estão descritas no Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 – Densidade aparente dos compósitos cobre com cinzas leves.

Liga Cobre e Cinzas leves	ρ ap. (g/cm³)
Cu5%Cinzas	1,713
Cu10%Cinzas	1,551
Cu15%Cinzas	1,390
Cu20%Cinzas	1,282

O valor obtido da densidade aparente é o primeiro ponto da curva de compressibilidade para cada compósito.

3.3.1.1 Compactação de amostras de cobre com cinzas leves

As misturas do pó de cobre com cinzas foram compactadas por prensa manual em matriz cilíndrica, gerando corpos de prova verdes. Os corpos de prova foram dimensionados

para a confecção da curva de compressibilidade, que é descrita em forma de gráfico, sendo que cada ponto utilizado para sua construção é a medida da densidade dos corpos de prova, pela pressão da compactação da amostra.

3.3.1.1.1 Compactação de cobre com 20% de cinzas leves

A compactação de cobre com 20% cinzas leves, gerou 7 amostras. No entanto as amostras compactadas com 600 e 700 MPa apresentaram microtrincas, como pode ser visto pela Figura 19.

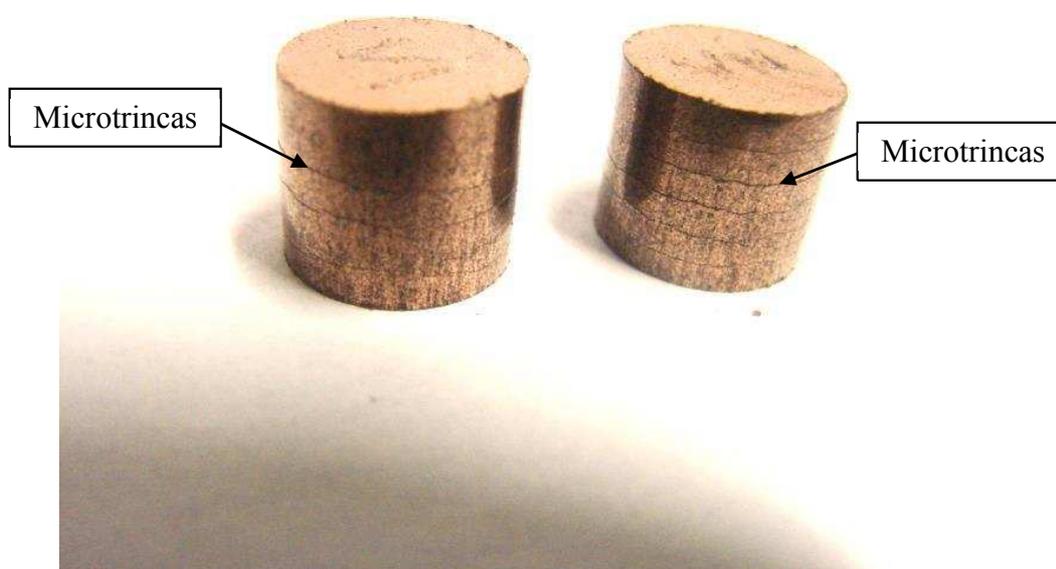


Figura 19 – Amostras com trincas devido a excesso de pressão na compactação.

Com a intenção de eliminar as trincas, foram compactadas novas amostras utilizando prensa automática, que gerou o mesmo problema encontrado nas amostras obtidas em prensa manual.

As dimensões das amostras de cobre com 20% de cinzas e as características dimensionais das peças verdes estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados obtidos das amostras verdes de cobre com 20% de cinzas leves.

Pressão (MPa)	100	200	300	400	500	600-700
Densidade verde (g/cm ³)	3,336	3,584	3,731	3,835	3,878	Fraturou

A curva de compressibilidade da liga Cu20%Cinzas está exibida na Figura 20.

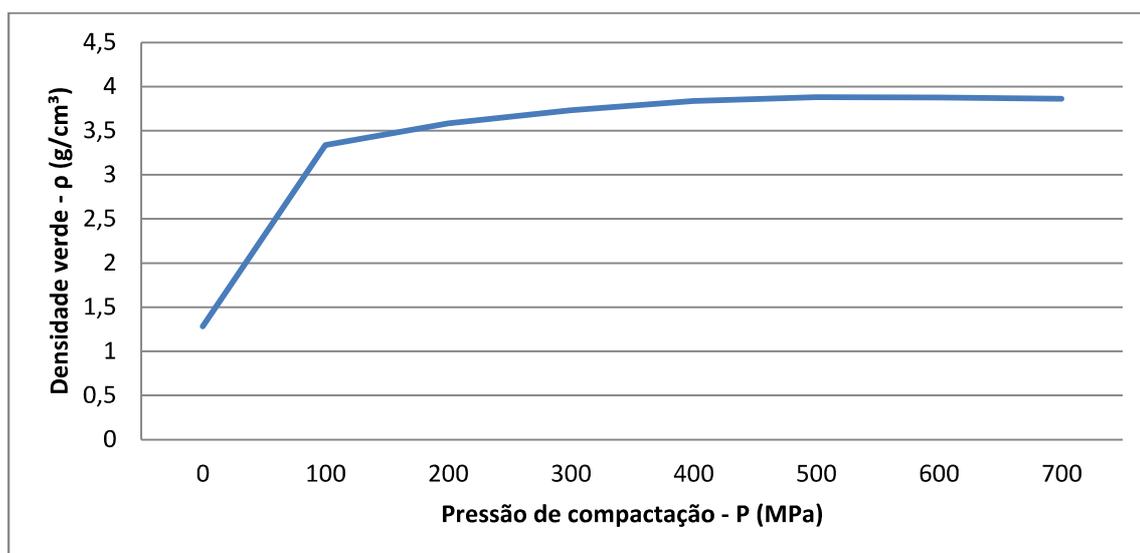


Figura 20 – Curva de compressibilidade da liga Cu20%Cinzas.

3.3.1.1.2 Compactação de cobre com 15% de cinzas leves

O dimensionamento das amostras compactadas com a mistura Cu15%Cinzas está descrito na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados obtidos das amostras verdes de cobre com 15% de cinzas leves.

Pressão (MPa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Densidade verde(g/cm³)	3,897	4,220	4,4	4,45	4,520	4,529	4,569	4,571	4,596	4,6

A curva de compressibilidade da liga Cu15%Cinzas está exibida na Figura 21.

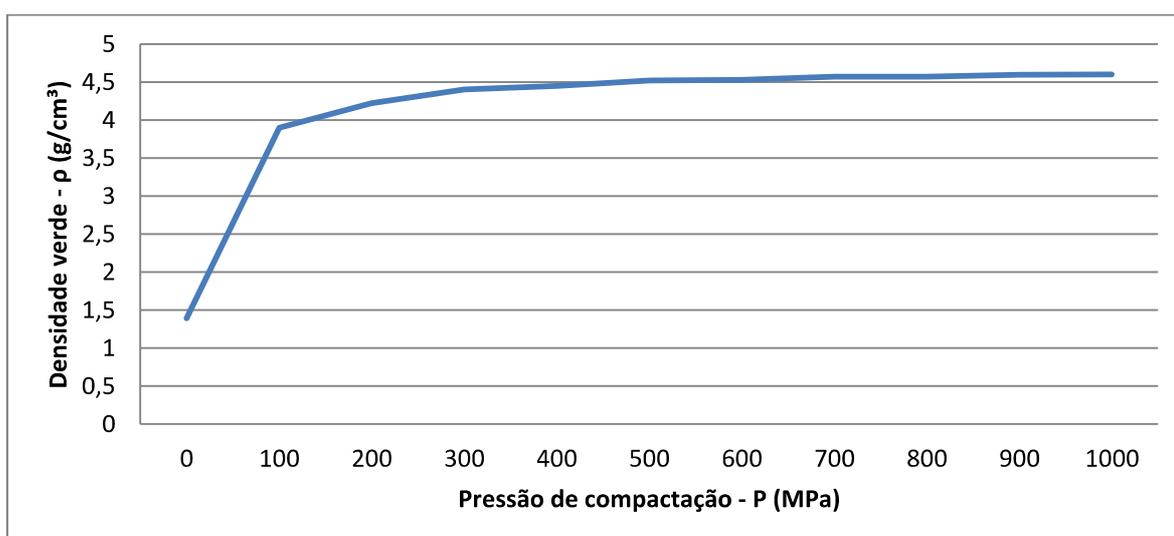


Figura 21 – Curva de compressibilidade da liga Cu15%Cinzas.

3.3.1.1.3 Compactação de cobre com 10% de cinzas leves

A compactação da mistura Cu10%Cinzas gerou 7 corpos de prova verdes, pois a partir de 700MPa as amostras fraturaram, como demonstra a Tabela 8, com os dimensionais das amostras.

Tabela 8 – Dados obtidos das amostras verdes de cobre com 10% de cinzas leves.

Pressão (MPa)	100	200	300	400	500	600	700	800-1000
Densidade verde (g/cm ³)	4,23	4,73	4,95	5,18	5,29	5,41	5,41	Fraturou

A curva de compressibilidade desta liga esta exibida na Figura 22.

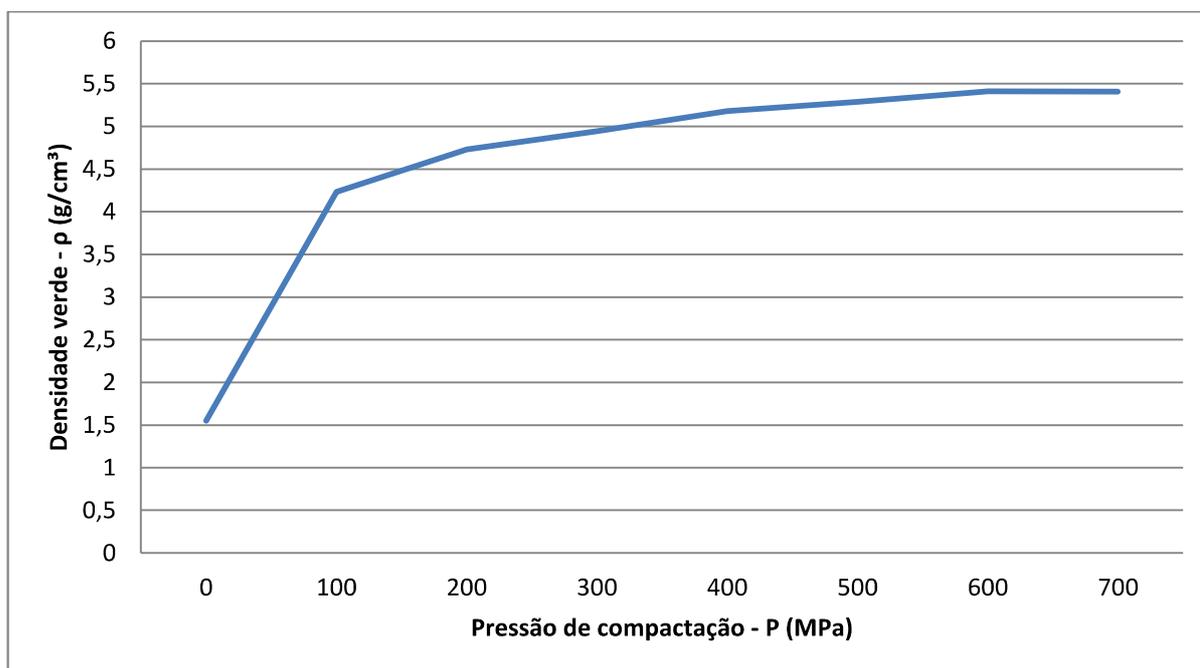


Figura 22 – Curva de compressibilidade da liga Cu10%Cinzas.

3.3.1.1.4 Compactação de cobre com 5% de cinzas leves

As amostras compactadas e dimensionadas da mistura cobre com 5% de cinzas, geraram os resultados descritos na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados obtidos das amostras verdes de cobre com 5% de cinzas leves.

Pressão (MPa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Densidade verde(g/cm ³)	5,046	5,498	5,739	5,787	5,823	5,874	5,889	5,939	5,942	5,910

A curva de compressibilidade da liga Cu5%Cz está exibida na Figura 23.

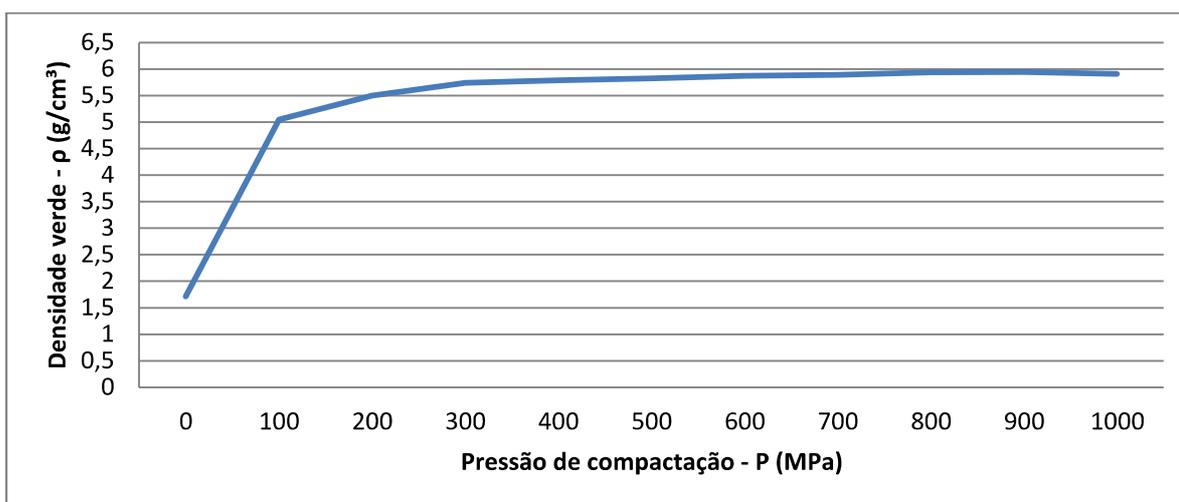


Figura 23 – Curva de compressibilidade da liga Cu5%Cinzas.

Após a coleta de dados dimensionais e elaboração das curvas de compressibilidade das ligas, as amostras verdes foram encaminhadas para o processo de sinterização.

3.3.1.2 Sinterização das amostras obtidas após mistura simples de pós

Após a compactação das amostras da liga e coleta dos dados dimensionais, os corpos de prova (peças verdes) foram encaminhados para a realização do tratamento térmico denominado sinterização.

Na etapa de sinterização do processo M/P as amostras foram colocadas dentro do forno com atmosfera controlada com gás marrom (25% hidrogênio e 75% nitrogênio), o aquecimento das amostras iniciou em temperatura ambiente (18 °C) e aumentou gradativamente com a taxa de 10 °C/min até alcançar a temperatura de 900 °C, onde permaneceu por uma hora, realizando assim a sinterização completa e união das partículas metálicas. Após a exposição, por uma hora, das amostras à temperatura de 900 °C, deu-se início o resfriamento em forno destas amostras.

Após a sinterização das amostras foram coletados os dados dimensionais para a verificação de contração volumétrica e densidade destes corpos de prova.

3.3.1.3 Análise dos corpos de prova obtidos após mistura simples de pós

3.3.1.3.1 Densidade

A densidade também conhecida por massa específica aparente foi determinada pelo método de Arquimedes, conforme norma MPIF-95, que baseia-se no empuxo exercido sobre

a peça durante sua imersão em um recipiente com água acoplado a uma balança. Através da determinação do volume da peça sinterizada determinou-se a densidade.

Para a melhor visualização da densificação dos sinterizados em relação às amostras verdes foram elaborados gráficos com as duas curvas de densidades (sendo que a curva de compressibilidade é indicada pelas densidades verdes).

A densificação, após a sinterização da mistura de Cu20%Cinzas está descrita pela Figura 24.

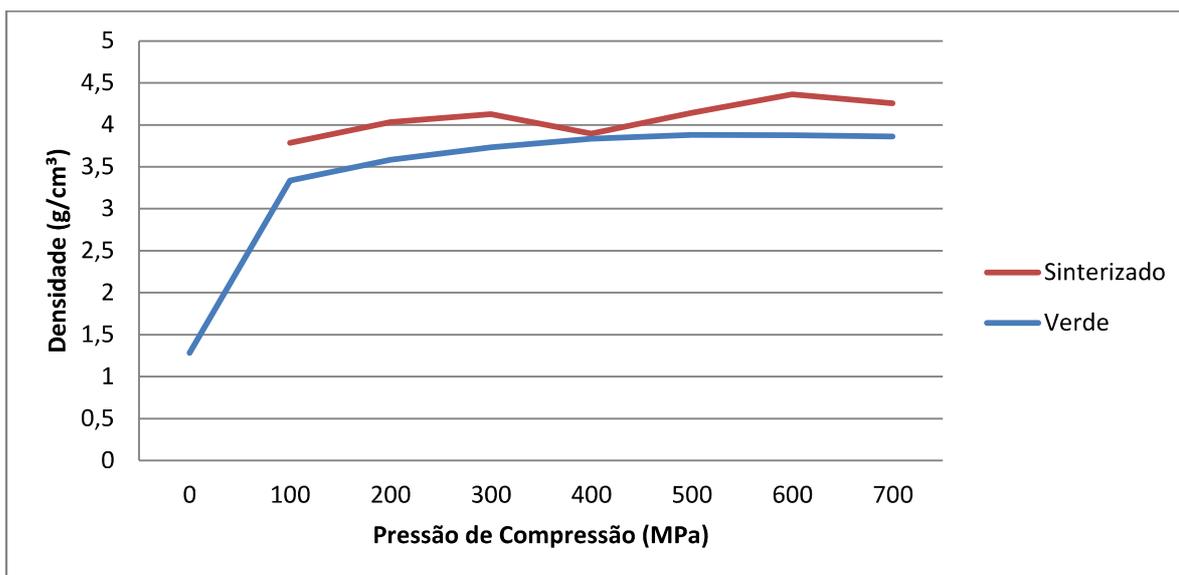


Figura 24 – Curva de densidade a verde e densidade do sinterizado – Cu20%Cz

A densificação, após a sinterização da mistura de Cu15%Cinzas pode ser vista na Figura 25.

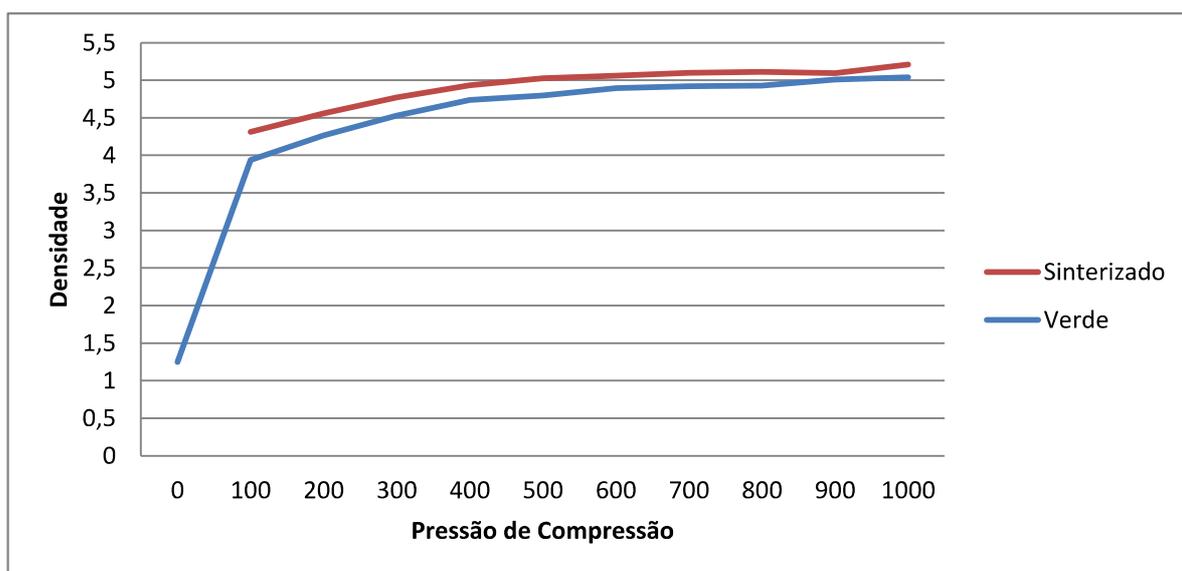


Figura 25 – Curva de densidade a verde e densidade do sinterizado – Cu15%Cz

A densificação da mistura de Cu10%Cinzas está expressa na Figura 26.

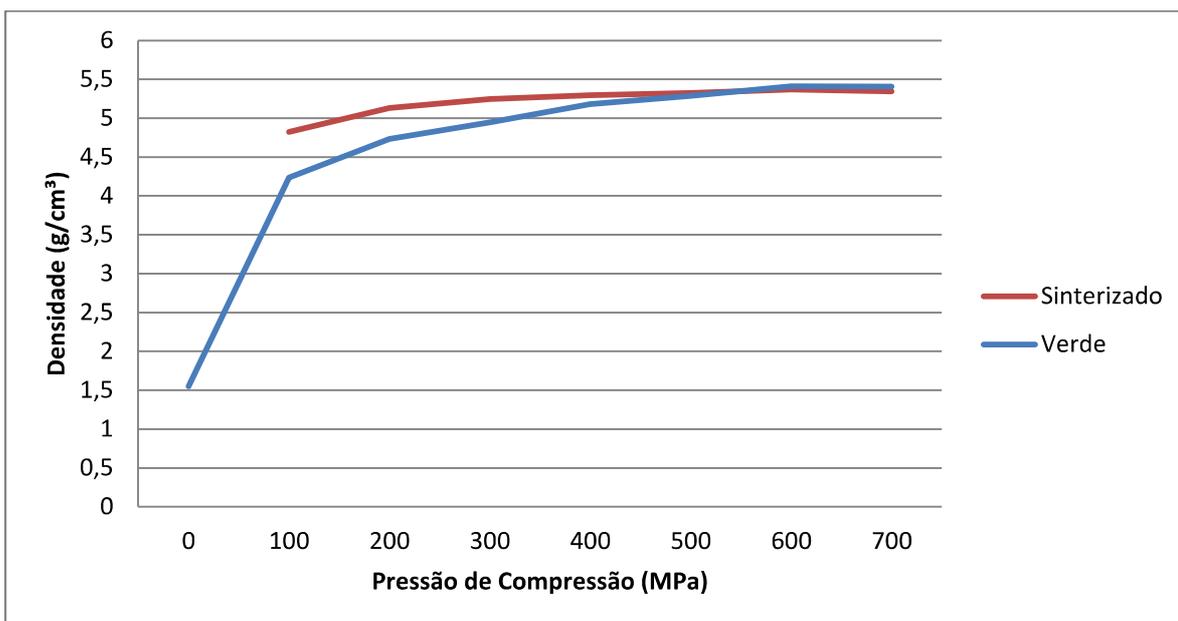


Figura 26 – Curva de densidade a verde e densidade do sinterizado – Cu10%Cz

Por fim, a densificação da mistura de Cu5%Cinzas apresenta o resultado expresso pela Figura 27.

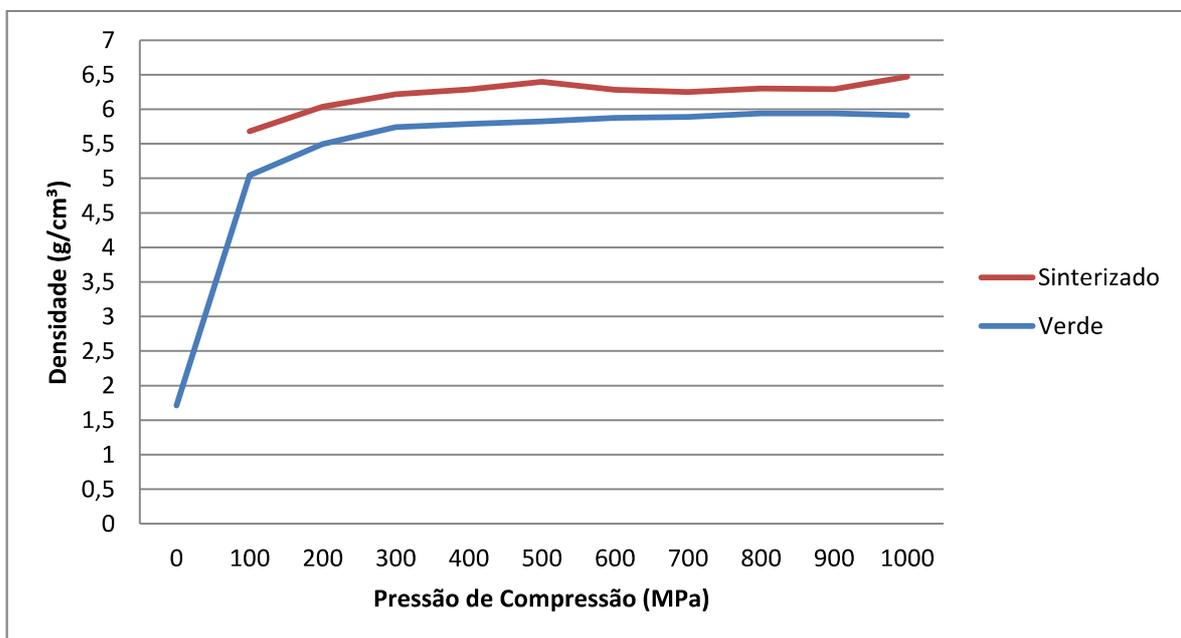


Figura 27 – Curva de densidade a verde e densidade do sinterizado - Cu5%Cz

3.3.1.3.2 Metalografia

Para a realização de microscopia, as amostras foram submetidas ao procedimento de lixamento, realizado em politriz metalográfica com lixas de papel com abrasivo tipo SiC

com granulometrias de número 120, 280, 320, 400, 600 e 1200, sempre trabalhando as amostras em 90° a cada troca de lixa.

As amostras foram submetidas ao polimento com pano de feltro e com abrasivo de óxido de alumínio para deixar a superfície das amostras espelhada. Na sequência, realizou-se limpeza com água corrente e também com álcool. Para realização do ataque químico utilizou-se o reagente HNO₃50% H₂O durante 10 segundos, conforme bibliografia [96] e depois foi feita a análise das microestruturas com auxílio do microscópio óptico.

3.3.1.3.3 Microdureza

A medida de microdureza Vickers, segundo a norma ASTM E 384 – Método de teste padrão para microdureza de materiais, define o ensaio de microdureza como a dureza de microindentações realizadas em equipamento calibrado com penetradores de diamantes de geometrias específicas.

Foi realizado o teste de microdureza em todas as amostras obtidas por Metalurgia do Pó convencional, com todos os percentuais de cinzas propostos para o estudo e os resultados obtidos estão expressos na Tabela 10.

Tabela 10 – Dureza Vickers média das amostras sinterizadas obtidas por mistura simples de pós.

Compósito	Amostra/pressão de compactação(MPa)									
	I/100	II/200	III/300	IV/400	V/500	VI/600	VII/700	VIII/800	IX/900	X/1000
Cu5%Cinzas	64	53	75	58	74	89	77	73	77	78
Cu10%Cinzas	70	67	71	75	70	85	81	-	-	-
Cu15%Cinzas	38	50	59	79	66	66	64	59	70	61
Cu20%Cinzas	63	49	67	47	32	40	37	-	-	-

Através da análise da Microdureza Vickers, com carga 25g, pôde ser observada qual amostra apresentou as melhores condições mecânicas, sabendo qual percentual de cinzas leves e em qual pressão de compressibilidade seria a melhor condição para a dureza deste compósito, sendo estas características de processo utilizadas nas amostras obtidas após moagem dos pós em moinho de bolas e em moinho planetário.

3.3.2 Moagem dos pós em moinho de bolas

Nesta etapa efetuou-se a mistura e moagem dos pós de cobre com cinzas leves em moinho de bolas, com câmara de aço inoxidável de volume de 1580 cm³. As esferas utilizadas na moagem eram de aço inoxidável com diâmetro de 6 milímetros. Foi utilizado 1/3 do volume da câmara com os pós de cobre com 5% de cinzas leves, colocado 1/3 do volume da câmara em esferas e acrescentado álcool isopropílico até que os 2/3 da câmara ocupada pelas esferas e pós ficassem completamente submersos.

Após a moagem do pó de cobre com óxido de alumínio as propriedades mecânicas, como a dureza por exemplo, aumentam neste MMC [91].

Foram retiradas amostras de pó após 3 tempos diferentes de moagem, sendo eles: 100 horas, 200 horas e 356 horas de moagem, para verificar a influência do tempo de moagem nas propriedades mecânicas das peças produzidas.

Após a moagem do pó pelo moinho de bolas, foram confeccionados corpos de prova nas melhores condições de dureza apresentadas pelas peças obtidas por mistura simples, com o intuito de comparar os resultados.

3.3.2.1 Compactação de amostras obtidas após moagem de pós

As amostras foram compactadas com pressão de 600 MPa, pois esta condição de pressão apresentou o melhor resultado para a propriedade mecânica de dureza nas amostras obtidas após a mistura simples de pós.

3.3.2.2 Pré aquecimento de amostras obtidas após moagem de pós

Devido a inúmeras impurezas e óxidos de baixo ponto de fusão existentes nas cinzas volantes [92], algumas amostras verdes foram condicionadas a um pré aquecimento, em atmosfera ambiente, de 300°C por um período de 60 minutos e com rampa de aquecimento de 5°C por minuto até atingir a temperatura. A finalidade foi de eliminar estes óxidos de baixo ponto de fusão antes da sinterização, evitando possíveis reações, prejudiciais, com as atmosferas utilizadas no forno de sinterização.

3.3.2.3 Sinterização de amostras obtidas após moagem de pós

A sinterização destas amostras foi realizada nas mesmas condições que as amostras obtidas sem moagem de pós.

Para se obter maiores informações sobre o comportamento deste MMC, também foram realizadas sinterizações substituindo o gás marrom, que é uma atmosfera redutora de óxidos, por gás argônio que é uma atmosfera inerte [93], com o intuito de comparar possíveis melhoras no comportamento mecânico das amostras.

Após a sinterização, foram coletados os dados dimensionais para a verificação de contração volumétrica e densidade das amostras.

3.3.2.4 Análise dos Corpos de prova obtidos após moagem de pós

3.3.2.4.1 Densidade

Para a melhor visualização da densificação dos sinterizados em relação às amostras verdes, tempo de moagem e condição de sinterização, os resultados foram expressos através de tabelas.

A Tabela 11 apresenta os resultados físicos obtidos após 100 horas de moagem.

Tabela 11 – Dados físicos obtidos das amostras Cobre5%Cinzas leves após 100 horas de moagem de pós.

100 horas de moagem			
Condição de sinterização	Com pré-aquecimento à 300°C sinterizada em atm. de Argônio	Sem pré-aquecimento sinterizada em atm. de Argônio	Com pré-aquecimento a 300°C sinterizada em atm. de Gás Marrom
Amostra	Peça I	Peça II	Peça III
$\rho v.$ (g/cm ³)	6,47	6,46	6,47
$\rho s.$ (g/cm ³)	6,62	6,85	7,32

A Tabela 12 apresenta os resultados físicos obtidos após 200 horas de moagem.

Tabela 12 – Dados físicos obtidos das amostras Cobre5%Cinzas leves após 200 horas de moagem de pós.

200 horas de moagem			
Condição de sinterização	Com pré-aquecimento à 300°C sinterizada em atm. de Argônio	Sem pré-aquecimento sinterizada em atm. de Argônio	Com pré-aquecimento a 300°C sinterizada em atm. de Gás Marrom
Amostra	Peça IV	Peça V	Peça VI
$\rho v.$ (g/cm ³)	6,96	6,82	6,94
$\rho s.$ (g/cm ³)	6,99	7,19	7,51

A Tabela 13 apresenta os resultados físicos obtidos após 356 horas de moagem.

Tabela 13 – Dados físicos obtidos das amostras Cobre5%Cinzas leves após 356 horas de moagem de pós.

356 horas de moagem			
Condição de sinterização	Com pré-aquecimento à 300°C sinterizada em atm. de Argônio	Sem pré-aquecimento sinterizada em atm. de Argônio	Com pré-aquecimento a 300°C sinterizada em atm. de Gás Marrom
Amostra	Peça VII	Peça VIII	Peça IX
$\rho v. (g/cm^3)$	6,64	6,61	6,55
$\rho s. (g/cm^3)$	6,09	6,15	6,28

3.3.2.4.2 Metalografia

Para a realização de microscopia, as amostras foram submetidas ao mesmo procedimento de lixamento, polimento e ataque químico realizado para as amostras obtidas por mistura simples de pós.

3.3.2.4.3 Microdureza

O procedimento de microdureza realizado foi o mesmo utilizado para as amostras obtidas por mistura simples de pós, no entanto as amostras obtidas após a moagem dos pós em moinho de bolas atingiram valores superiores em algumas condições de sinterização, como exibe a Tabela 14.

Tabela 14 – Microdureza das amostras sinterizadas obtidas após moagem por moinho de bolas.

Condição de sinterização	Com pré-aquecimento à 300°C sinterizada em atm. de Argônio			Sem pré-aquecimento sinterizada em atm. de Argônio			Com pré-aquecimento a 300°C sinterizada em atm. de Gás Marrom		
	100	200	356	100	200	356	100	200	356
Horas de moagem	100	200	356	100	200	356	100	200	356
Dureza (HV)	121	105	102	111	81	70	122	89	76

3.3.3 Moagem de alta energia dos pós em moinho planetário

Nesta etapa efetuou-se a moagem de alta energia dos pós de cobre com cinzas leves em moinho planetário, pois a literatura apresenta que a moagem de alta energia do pó de cobre com alumina tende a aumentar as propriedades mecânicas deste compósito, como a dureza por exemplo [94, 18]. O moinho planetário utilizado possuía uma câmara de aço inoxidável de volume de 500 cm³. As esferas utilizadas na moagem eram de aço inoxidável com diâmetro de 6 milímetros. Foi utilizado 1/3 do volume da câmara com o os pós de cobre

com 5% de cinzas leves, colocado 1/3 do volume da câmara em esferas e acrescentado álcool isopropílico até que os 2/3 da câmara ocupada pelas esferas e pós ficassem completamente submersos.

Os pós de cobre e cinzas foram submetidos a moagem de alta energia durante 16 horas, pois o aumento de dureza após esse período de tempo torna-se insignificante [94].

O ciclo de moagem utilizado totalizou 24 horas, com moagens de 5 minutos e intervalos de parada de 2,5 minutos para evitar o superaquecimento da câmara do moinho, que não possui resfriamento controlado.

Após a moagem de alta energia dos pós, foram confeccionados corpos de prova nas melhores condições de dureza apresentadas pelas peças obtidas por mistura simples e por moagem simples dos pós, com o intuito de comparar os resultados.

3.3.3.1 Compactação de amostras obtidas após moagem de alta energia dos pós

As amostras foram compactadas com pressão de 600 MPa, pois esta condição de pressão apresentou o melhor resultado para a propriedade mecânica de dureza nas amostras obtidas na primeira etapa do estudo (com a mistura simples de pós).

3.3.3.2 Pré-aquecimento de amostras obtidas após moagem de alta energia dos pós

Devido a inúmeras impurezas e óxidos de baixo ponto de fusão existentes nas cinzas volantes [92], algumas amostras verdes foram condicionadas a um pré aquecimento, em atmosfera ambiente, de 300 °C por um período de 60 minutos e com rampa de aquecimento de 5°C por minuto até atingir a temperatura. A finalidade foi de eliminar estes óxidos de baixo ponto de fusão antes da sinterização, evitando possíveis reações, prejudiciais, com as atmosferas utilizadas no forno de sinterização.

3.3.3.3 Sinterização de amostras obtidas após moagem de alta energia dos pós

A sinterização destas amostras foram realizadas nas mesmas condições que as amostras obtidas nas etapas de mistura simples de pós e moagem de pós em moinho de bolas. Porém utilizou-se apenas o gás marrom como atmosfera no forno, pois na etapa de moagem dos pós em moinho de bolas notou-se que esta condição obteve-se o melhor resultado.

Após a sinterização das amostras, foram coletados os dados dimensionais para a verificação de contração volumétrica e densidade destes corpos de prova.

3.3.3.4 Análise dos Corpos de prova obtidos após moagem de alta energia dos pós

3.3.3.4.1 Densidade

Para a melhor visualização da densificação dos sinterizados em relação às amostras verdes e condição de sinterização, os resultados foram expressos através da Tabela 15.

Tabela 15 – Densidade das amostras Cobre5%Cinzas leves após moagem de alta energia dos pós.

Amostra	Amostra I	Amostra II
$\rho v. (g/cm^3)$	6,087	6,28
$\rho s. (g/cm^3)$	7,37	7,95

3.3.3.4.2 Metalografia

Para a realização de microscopia, as amostras foram submetidas ao mesmo procedimento das etapas de mistura simples e moagem em moinho de bolas dos pós de cobre com cinzas.

3.3.3.4.3 Microdureza

O procedimento de microdureza realizado foi o mesmo utilizado para as amostras obtidas pelos métodos de mistura simples de pós e moagem de pós em moinho de bolas, no entanto as amostras obtidas após a moagem de alta energia dos pós atingiram valores equivalentes aos obtidos pelas amostras confeccionadas após moagem dos pós em moinho de bolas, como exhibe a Tabela 16.

Tabela 16 – Microdureza das amostras sinterizadas obtidas após moagem de alta energia

Amostra	I	II
Dureza (HV)	121	120

3.4 Microscopia eletrônica de varredura das amostras de Cobre5%Cinzas leves

As misturas dos pós e as amostras que apresentaram os melhores resultados nas propriedades físicas e mecânicas foram observadas e analisadas em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS. As amostras sinterizadas foram recobertas por carbono e analisadas no equipamento JSM 5800 para comparação e análise de propriedades.

3.5 Análise via EDS das amostras de Cobre5%Cinzas leves

As análises por espectroscopia de energia dispersiva foram realizadas no MEV JSM 5800 do Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS, num sistema de microsonda da marca Noran Instruments, acoplado ao MEV.

3.6 Resistividade elétrica das amostras de Cobre5%Cinzas leves

Para o ensaio de resistividade elétrica foram confeccionados corpos de prova em formato de anéis, conforme ilustra a Figura 28, nas mesmas condições de preparo que os corpos de prova cilíndricos que apresentaram durezas superiores a 120 HV.



Figura 28 – Anéis para teste de resistividade

A medição de resistividade elétrica do compósito foi obtida conforme o procedimento padrão adotado pelo LdTM e ilustrado na Figura 29.



Figura 29 – Ensaio de resistividade

Os resultados obtidos nos testes de resistividade estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resistividade elétrica do compósito Cobre5%Cinzas leves

Processo de obtenção do compósito	Moagem dos pós em moinho de bolas	Moagem de Alta Energia dos pós
Resistividade (Ωm)	0	0

Todos os resultados demonstraram resistividade nula para o compósito, sendo a medição de tensão no milimultímetro zero durante o ensaio. Para confirmar e validar este resultado, foi medido a resistividade de anéis com composição Ferro2%Fósforo, cujo valor da resistividade é de $4,21 \times 10^{-7} \Omega\cdot\text{m}$ [95]. Durante o ensaio, foi confirmado o valor na ordem de $4,21 \times 10^{-7} \Omega\cdot\text{m}$ para os anéis Ferro2%Fósforo, comprovando também a aferição do equipamento.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Mistura simples de pós

4.1.1 Compressibilidade e densidade de amostras obtidas após mistura simples de pós

Os melhores valores de compressibilidade (densidade da peça verde) e densidade da peça sinterizada obtidos no compósito de cobre com 20% de Cinzas leves foram apresentadas pelas amostras compactadas com 300 MPa a 500 MPa, sendo assim pode-se afirmar que acima de 300 MPa a densidade começa a se estabilizar, pois a variação de densidade não ultrapassa $0,1479 \text{ g/cm}^3$. A partir de uma pressão de compactação de 600 MPa, os corpos de prova sofrem danos devido a excesso de pressão na compactação, com isso as amostras compactadas com 600 MPa e 700 MPa apresentaram microtrincas e fraturaram após a sinterização. O corpo de prova sinterizado a uma pressão de 300 MPa apresentou bom resultado de densidade e também boa densificação, no entanto a maior densidade e densificação foi apresentada pelo corpo de prova compactado a 600 MPa, porém este corpo de prova apresentou fraturas após sinterizado.

A densidade da peça verde e densidade da peça sinterizada obtidos no compósito de cobre com 15% de Cinzas leves apresentaram melhores resultados de densidade em amostras compactadas a partir da pressão de 600 MPa, com variação de $0,1456 \text{ g/cm}^3$ para as amostras compactadas com maior pressão. A melhor densificação apresentou-se na amostra compactada à pressão de 100 MPa, porém a maior densidade foi apresentada pela amostra compactada a 1000 MPa.

A densidade da peça verde e densidade da peça sinterizada obtidos no compósito de cobre com 10% de Cinzas leves apresenta melhores resultados para compactação em amostras obtidas com pressão acima de 400 MPa. As densidades dos sinterizados demonstram que a melhor densificação foi apresentada na amostra compactada à pressão de 100 MPa, porém a densidade dos sinterizados aumenta até a pressão de compressibilidade de 500 MPa e sofre pequenos decréscimos nas amostras compactadas a 600 e 700 MPa, isto devido a microtrincas geradas no material cerâmico durante a sinterização.

No compósito de cobre com 5% de Cinzas leves percebe-se que pressões entre 400 MPa e 500 MPa apresentam bons resultados de densidade a verde, sendo assim, ideais para compactação. A partir da pressão de 500 MPa os corpos de prova não apresentam aumento significativo de densidade, ou seja, esforço desnecessário utilizado pela máquina, pois não há mudança específica no resultado da compressibilidade. Ao observar-se a densidade da peça sinterizada do compósito de cobre com 5% de cinzas leve nota-se que a densidade

obtida na amostra compactada a uma pressão de 500 MPa apresentou melhor resultado de densificação, porém a maior densidade é alcançada pela amostra compactada a 1000 MPa.

4.1.2 Metalografia de amostras obtidas após mistura simples dos pós

4.1.2.1 Análise microestrutural

Identificou-se a partir da análise metalográfica que não houve interação entre o cobre e as cinzas leves. Observou-se, também, grande quantidade de porosidade nas amostras conforme ilustra a Figura 30.

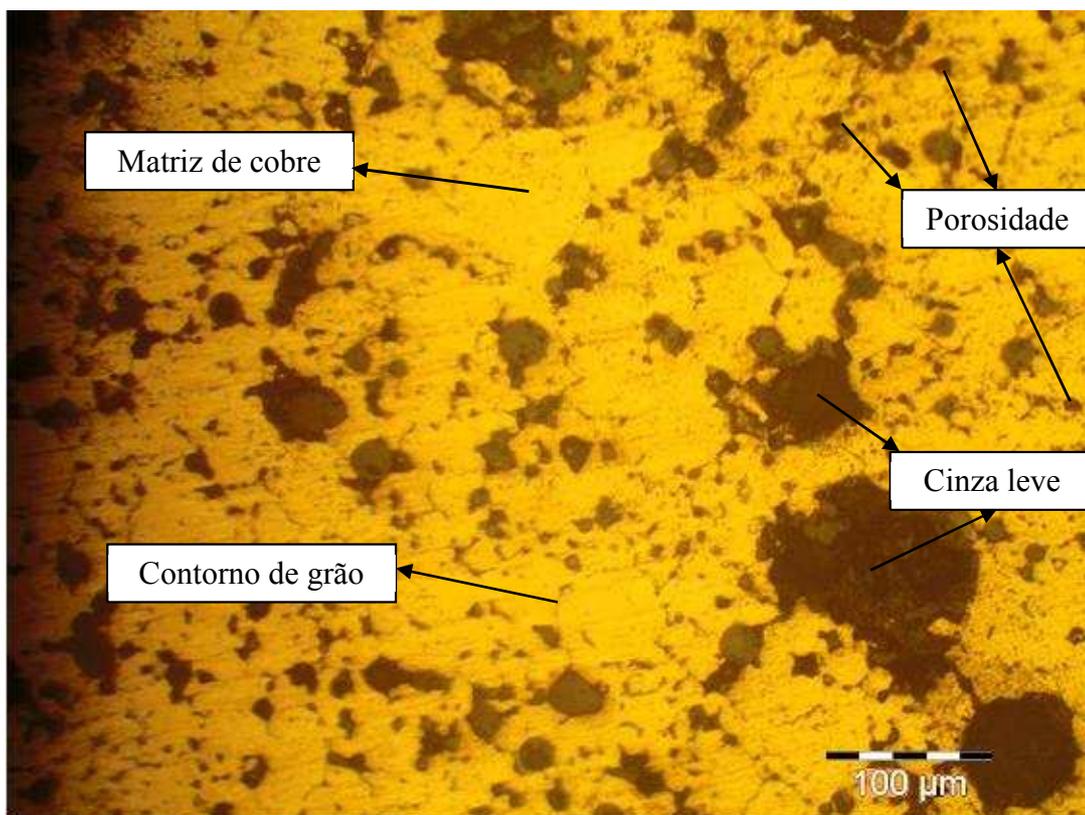


Figura 30 – Metalografia sem ataque químico – amostra de mistura simples de pós

As amostras foram submetidas a ataque químico com HNO_3 50% H_2O , que é indicado para o cobre puro e suas ligas [96] o que confirmou a não inclusão das cinzas ao cobre. Observou-se que a estrutura micrográfica do cobre permaneceu inalterada, ou seja, sem interação química com nenhum elemento, conforme apresenta a literatura [96] e está ilustrado na Figura 31.

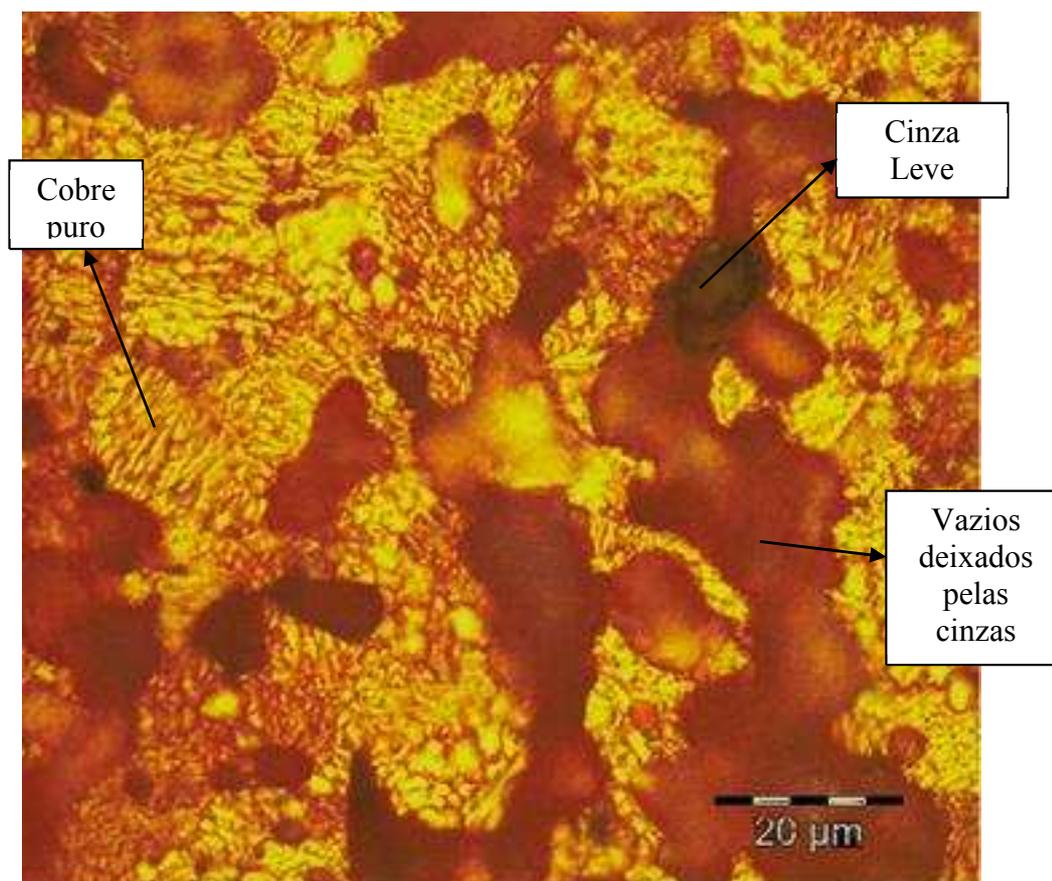


Figura 31 – Metalografia com ataque químico – amostra de mistura simples de pó

4.1.3 Microdureza de amostras obtidas após mistura simples dos pó

Para efetuar as medições de microdureza foi utilizada a escala de medição Vickers. Foram realizadas 5 medições em cada amostra dos conjuntos de compósitos (5%,10%,15%,20% de cinzas leves) e efetuou-se uma média aritmética de cada conjunto, seguindo procedimentos utilizados na literatura [97]. Os resultados das microdurezas estão descritas na Tabela 10. Ao analisar-se as medições verifica-se que nenhuma amostra superou a dureza máxima estimada para o cobre eletrolítico puro, que é de 55 HRB [98], que é equivalente à 95 HV [99]. O melhor resultado para a propriedade mecânica de dureza ocorreu na amostra VI da composição cobre com 5% de Cinzas leves, compactada com uma pressão de 600 MPa. Utilizando como referência as condições de percentual da mistura, compactação e sinterização da amostra VI (que apresentou a maior dureza), deu-se início à próxima etapa do estudo.

Nesta etapa, o pó de cobre com 5% de cinzas, foi submetido à moagem simples por moinho de bolas, com o intuito de criar uma pré-liga entre os pó para formação de um compósito.

4.2 Moagem de pós por moinho de bolas

4.2.1 Densidade das amostras obtidas após moagem por moinho de bolas

Analisando a densidade das amostras obtidas após 100 horas de moagem dos pós observa-se que a maior densidade obtida foi de $7,32 \text{ g/cm}^3$ na amostra submetida à pré-aquecimento de $300 \text{ }^\circ\text{C}$ em atmosfera ambiente e sinterizada com atmosfera de gás marrom, que propiciou a redução de óxidos de cobre e favorecendo no aumento da densidade.

Em amostras obtidas após 200 horas de moagem dos pós nota-se que a maior densidade foi de $7,51 \text{ g/cm}^3$ apresenta pela amostra submetida à pré-aquecimento de $300 \text{ }^\circ\text{C}$ em atmosfera ambiente e sinterizada com atmosfera de gás marrom, que propiciou a redução de óxidos de cobre e favorecendo no aumento da densidade.

Os resultados de densidade obtidos após 356 horas de moagem dos pós demonstraram que este tempo de moagem não possibilita maiores valores de densidade para peças sinterizadas, independente da condição de sinterização utilizada.

Os tempos de 100 e 200 horas de moagem possibilitam densidades de $7,32 \text{ g/cm}^3$ e $7,51 \text{ g/cm}^3$, superando a densidade do compósito de cobre com 5% alumina que é de $6,20 \text{ g/cm}^3$ [19] e a do compósito de cobre com 4% alumina que é de $7,21 \text{ g/cm}^3$ [94].

4.2.2 Metalografia de amostras obtidas após moagem por moinho de bolas

4.2.2.1 Análise microestrutural

Identificou-se a partir da análise metalográfica que após a moagem entre o cobre e as cinzas leves, houve a interação de parte dos óxidos contidos nas cinzas, tendo em vista que grande parte das cinzas não está em sua forma esférica, conforme ilustra a Figura 32.

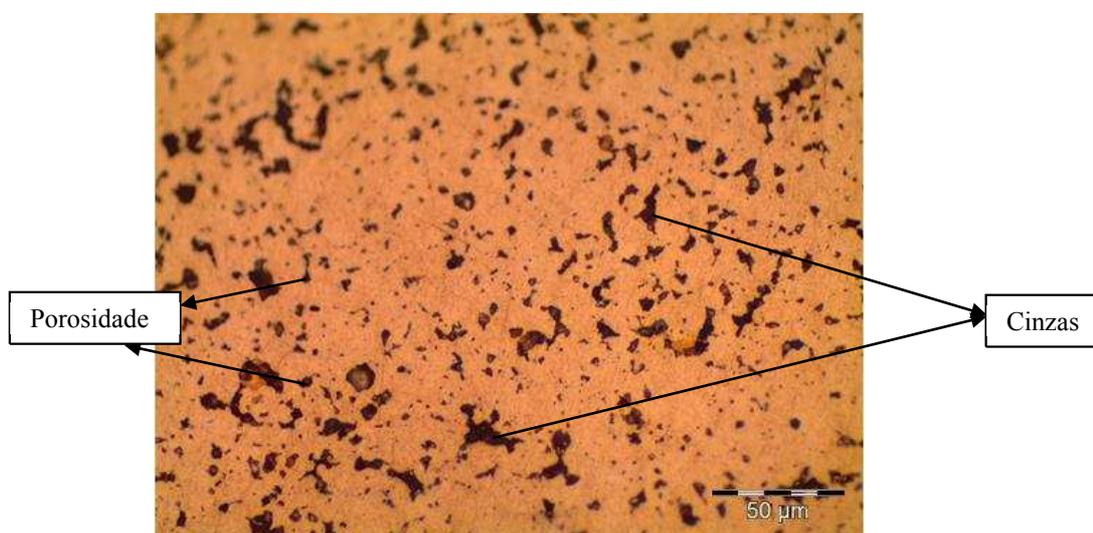


Figura 32 – Metalografia sem ataque químico – amostra de moagem por moinho de bolas

As amostras foram submetidas a ataque químico com HNO_3 50% H_2O , que é indicado para o cobre puro e suas ligas [96], onde pode ser vista inclusão de parte das cinzas ao cobre. Durante o ataque químico, alguns grãos de cinzas desprenderam da amostra e observou-se que ao redor dos vazios deixados o material não apresentou a estrutura micrográfica do cobre, ou seja, houve interação química com algum elemento das cinzas, conforme ilustra a Figura 33.

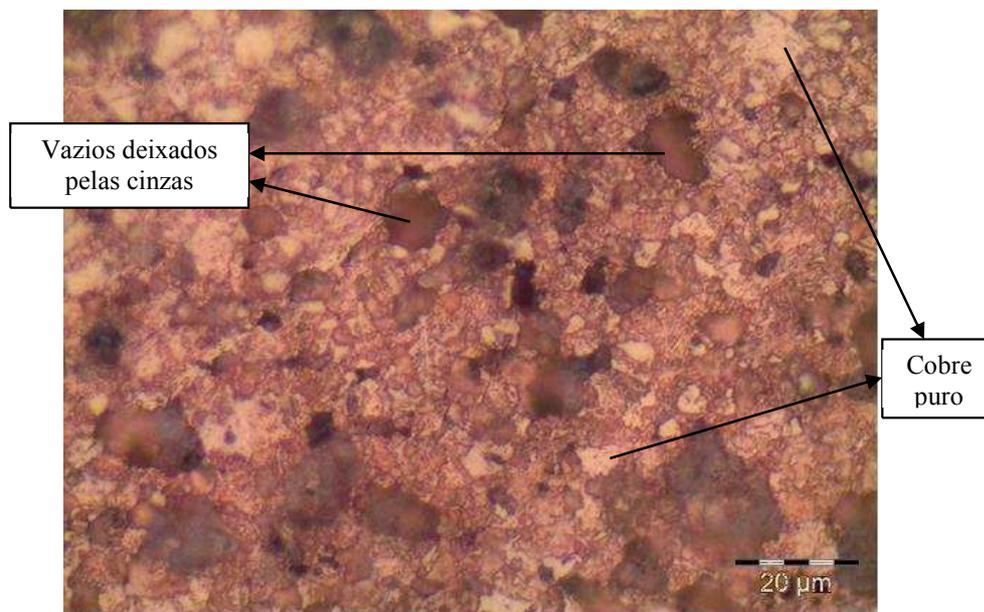


Figura 33 – Metalografia com ataque químico – amostra de moagem por moinho de bolas

4.2.3 Microdureza de amostras obtidas após moagem por moinho de bolas

Ao analisar-se as medições de microdureza, nas amostras obtidas após moagem dos pós em moinho de bolas, verifica-se que o maior resultado para a propriedade mecânica de dureza ocorreu na amostra confeccionada com o pó moído por 100 horas, submetido ao pré aquecimento de 300 °C em atmosfera ambiente e sinterizado com atmosfera de gás marrom, superando a dureza máxima estimada para o cobre eletrolítico puro, que é de 55 HRB [98], equivalente à 95 HV [99]. A dureza para compósitos de cobre com até 4,1% de alumina está entre 117 HV e 137 HV [18] e o compósito de cobre com 5% de cinzas leves obtidos após moagem dos pós apresentou 122 HV de dureza, estando dentro do intervalo encontrado na bibliografia. No entanto as cinzas leves possuem cerca de 20% de alumina em sua composição, o que caracteriza apenas 1% de alumina no compósito de cobre que utiliza 5% de cinzas leves. Já os compósitos de cobre com 1% de alumina pura apresentam 54 HV [100, 102].

4.3 Moagem de Alta Energia dos pós

4.3.1 Densidade das amostras obtidas após moagem de alta energia

A maior densidade nas amostras obtidas após a moagem de alta energia dos pós foi medida na amostra II, atingindo $7,95 \text{ g/cm}^3$ e a variação máxima da densidade entre as peças sinterizadas foi de 7,3%. A moagem de alta energia dos pós propicia para as amostras sinterizadas uma densidade superior às densidades de peças obtidas após moagem simples dos pós, no intervalo de $7,32 \text{ g/cm}^3$ à $7,51 \text{ g/cm}^3$, densidades dos compósito de cobre com 5% de alumina ($6,20 \text{ g/cm}^3$ [19]), compósitos de cobre com 4% de alumina ($7,21 \text{ g/cm}^3$ [94]) e compósitos de $\text{Cu}_{0,5}\text{Al}$ com 0,6% de Alumina, que atinge $7,89 \text{ g/cm}^3$ de densidade [91].

4.3.2 Metalografia de amostras obtidas após moagem de alta energia

4.3.2.1 Análise microestrutural

Identificou-se a partir da análise metalográfica que após a moagem de alta energia entre o cobre e as cinzas leves, houve a interação dos óxidos das cinzas ao cobre, tendo em vista que grande parte das cinzas não está em sua forma esférica, conforme ilustra a Figura 34.

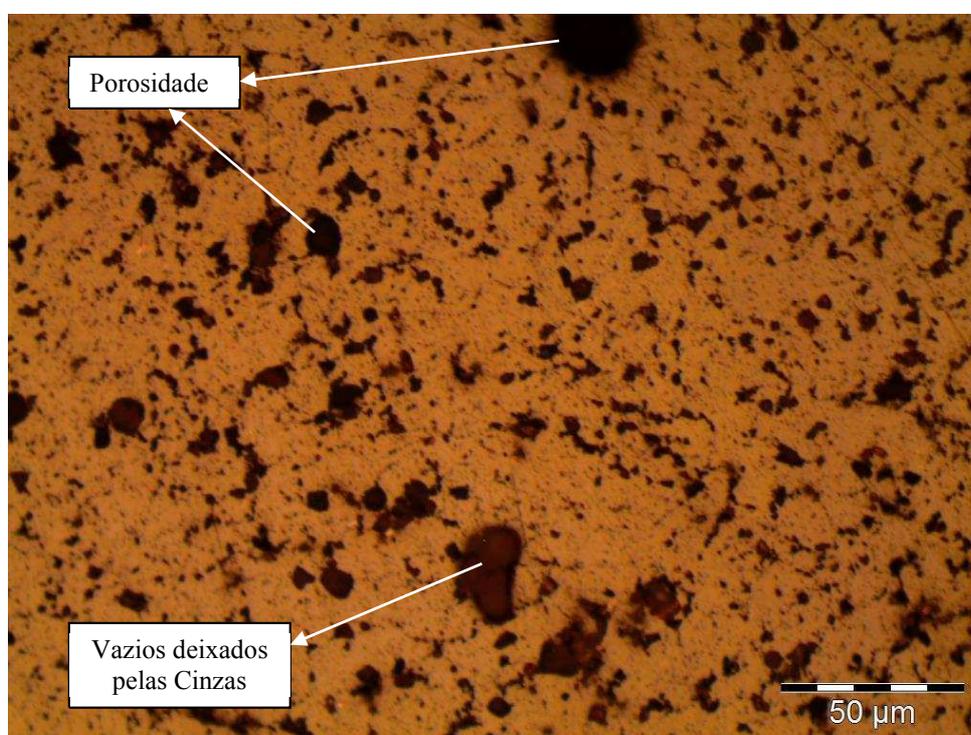


Figura 34 – Metalografia sem ataque químico – amostra de moagem de alta energia

As amostras foram submetidas a ataque químico, onde pode ser visto a inclusão dos óxidos das cinzas ao cobre. Nota-se que grande parte da peça não apresentou a estrutura micrográfica do cobre puro, ou seja, houve interação química com os óxidos das cinzas, conforme ilustra a Figura 35.

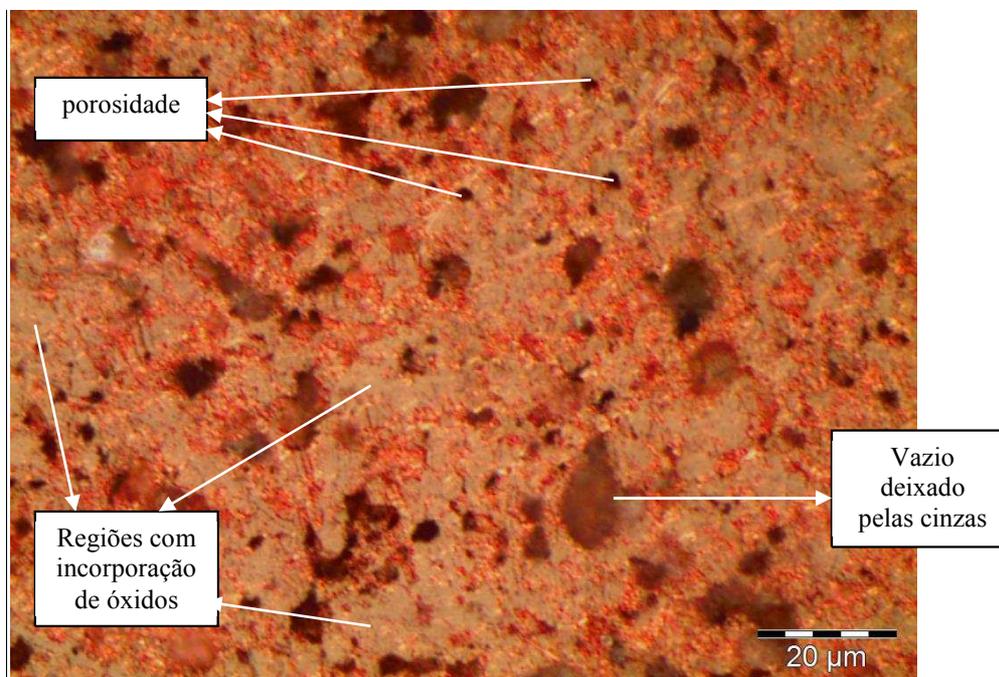


Figura 35 – Metalografia com ataque químico – amostra de moagem de alta energia

4.3.2 Microdureza de amostras obtidas após moagem de alta energia

Ao analisar-se as medições de microdureza das amostras obtidas após moagem de alta energia, nota-se que a dureza não supera a dureza obtida nas peças produzidas após a moagem por moinho de bolas. Devido à variação de apenas 1 HV como diferença para a dureza máxima entre os processos de moagem utilizados, pode-se afirmar que 100 horas de moagem em moinho de bolas equivalem a 24 horas de moagem de alta energia para atingir uma dureza superior à 120 HV. A dureza apresentada nas amostras obtidas após o processo de moagem de alta energia também supera a dureza máxima estimada para o cobre eletrolítico puro, que é de 55 HRB [98], equivalente à 95 HV [99] e dureza para compósitos de cobre com 1% de alumina, cerca de 54 HV [100, 102].

A dureza para o compósito de cobre com 5% de cinzas leves, obtido após moagem de alta energia de pós está dentro do intervalo encontrado na bibliografia para compósitos de cobre com até 4,1% de alumina, que apresentam durezas entre 117 HV e 137 HV [18].

4.4 Análise da porosidade do compósito de cobre com 5% de cinzas leves

A Figura 36 demonstra a diferença da porosidade e tamanho das partículas de cinzas entre as peças obtidas após o processo de mistura simples de pós, moagem em moinho de bolas e por moagem de alta energia.

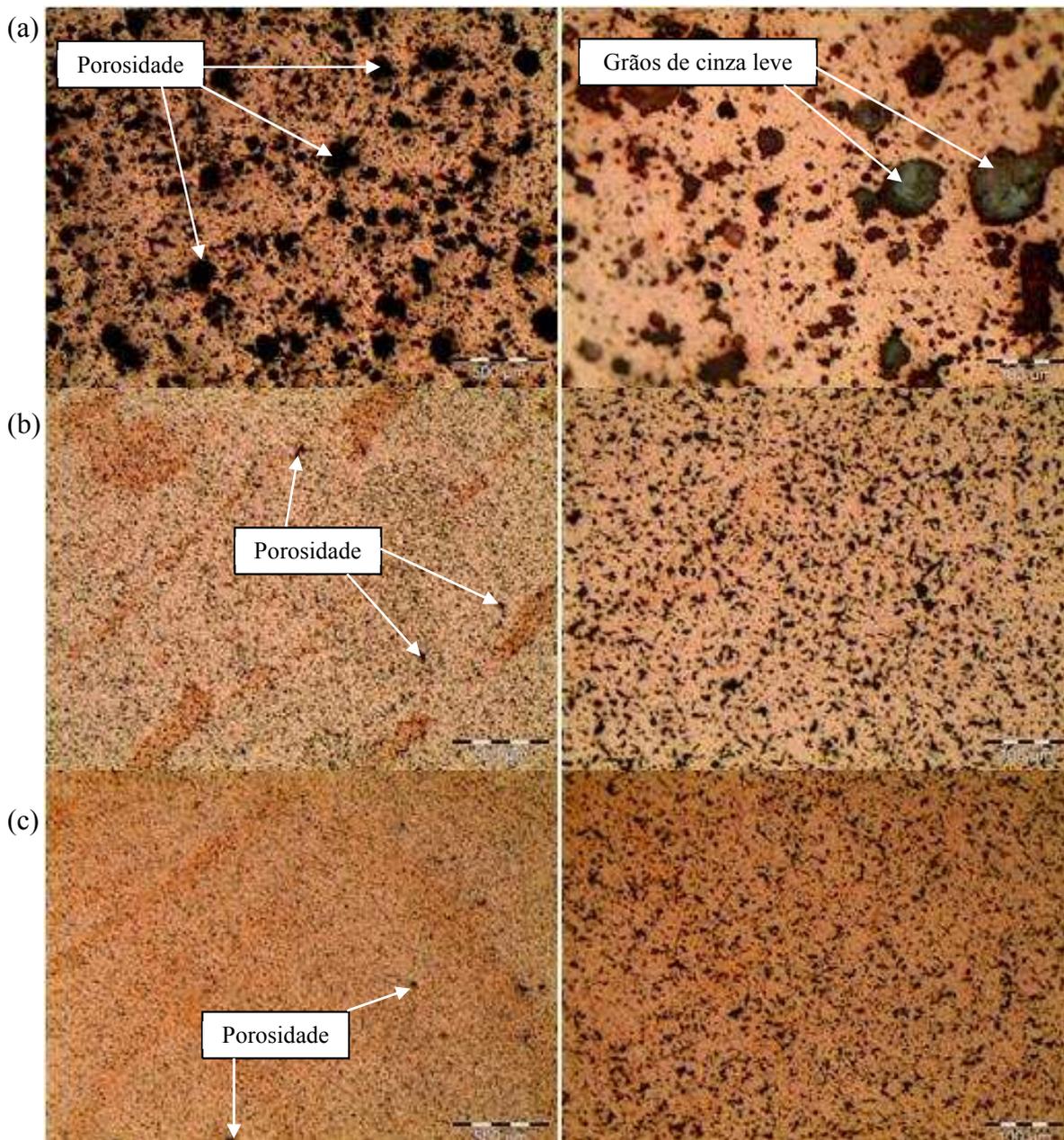


Figura 36 – Amostras obtidas pelos diferentes processos. (a) mistura simples de pós; (b) moagem em moinho de bolas; (c) moagem de alta energia.

Através da Figura 36, observa-se nitidamente que a porosidade e o tamanho das partículas de cinzas diminuíram consideravelmente após os processos de moagem em moinho de bolas (b) e moagem de alta energia (c) em relação ao processo de mistura simples

de pós (a). Também é possível perceber que o processo de moagem de alta energia (c) é o que apresenta porosidades menores. Nos processos (b) e (c) não é possível identificar os grãos de cinzas, pois houve a incorporação dos óxidos na matriz de cobre, já no processo (a), claramente notam-se os grãos de cinzas sem interação com o cobre (imagem superior direita).

4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura do composto de cobre com 5% de cinzas leves

Os pós de cobre com 5% de cinzas leves, nas diferentes condições de mistura e moagem, foram encaminhados ao ensaio de microscopia eletrônica de varredura em equipamento MEV JSM-5800 com o intuito de verificar a dispersão de partículas e tamanho dos grãos de pós.

A Figura 37 apresenta a imagem com magnificação de 700 X do pó Cobre5%Cinzas leves obtido por mistura simples de pós em misturador “Duplo V”.

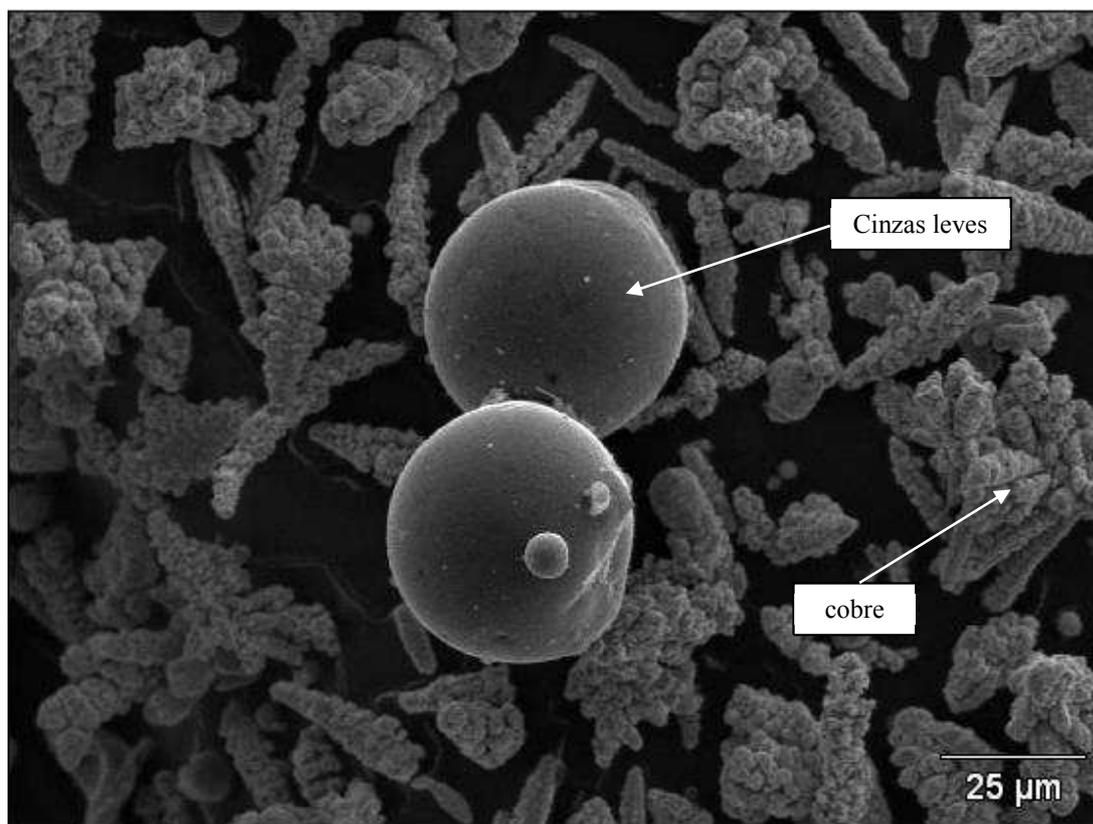


Figura 37 – Pó de Cobre5%Cinzas leves após mistura simples de pós

Os pós misturados em misturador duplo V, não sofrem modificações em seu tamanho ou morfologia, como pode ser visto na Figura 37. O tamanho das partículas de cobre e cinzas permanece com o mesmo tamanho apresentado pela literatura, ficando entre 55µm e

45 μm , respectivamente. Também nota-se que os pós apresentam-se dispersos uns nos outros.

A Figura 38 apresenta imagens em diferentes aumentos do pó de Cobre5%Cinzas leves após a moagem por moinho de bolas durante 100 horas de moagem.

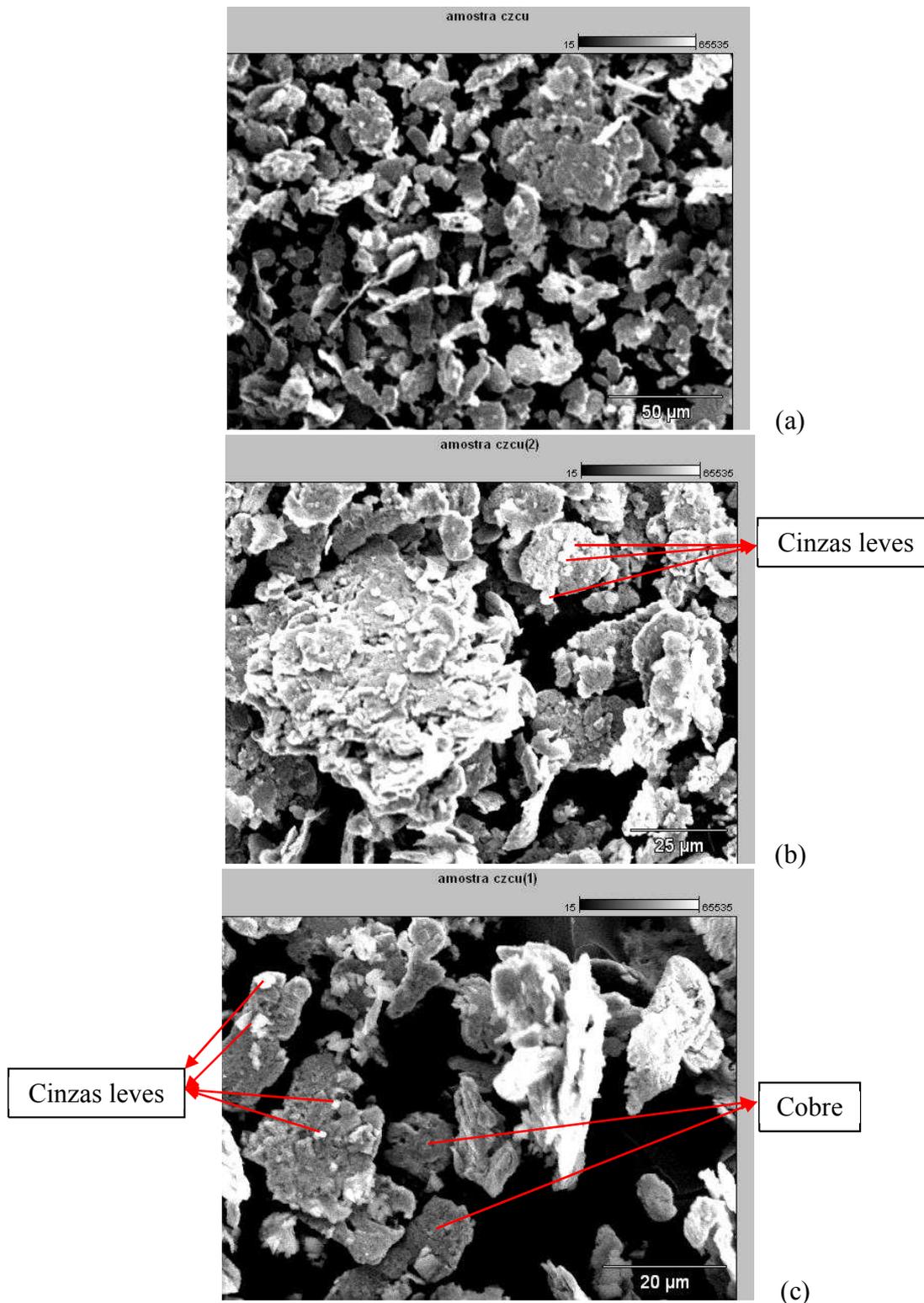


Figura 38 – Pó de Cobre5%Cinzas leves após 100 horas de moagem em moinho de bolas (a) ampliação de 350 X; (b) ampliação de 900 X; (c) ampliação de 1300 X

As imagens do pó obtido após moagem em moinho de bolas, exibido pela Figura 38, demonstram que as partículas de cobre ficaram achatadas devido ao impacto com as esferas e, em relação à barra da escala, apresentaram tamanho entre 5 e 30 μm aproximadamente. As partículas de cinzas, utilizando como referência a barra da escala, apresentaram tamanho entre 2 e 5 μm aproximadamente e estão sempre associadas a algum grão de cobre, como pode ser visualizado na Figura 38 (b).

A Figura 39 apresenta a imagem com aumento de 900 X do pó de Cobre5%Cinzas leves após a moagem por moinho de bolas durante 200 horas de moagem.

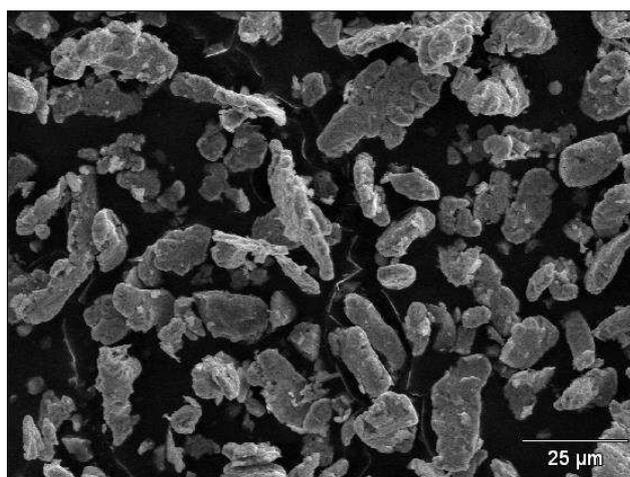


Figura 39 – Pó de Cobre5%Cinzas leves após 200 horas de moagem em moinho de bolas

Pode ser visto na Figura 39 que o tamanho das partículas de cobre não apresentou mudança, permanecendo nas dimensões das partículas obtidas após 100 horas de moagem. No entanto, para este tempo de moagem não existe a associação dos grãos de cinzas leves aos grãos de cobre.

A Figura 40 apresenta a imagem com aumento de 350 X do pó de Cobre5%Cinzas leves após a moagem por moinho de bolas durante 356 horas de moagem.

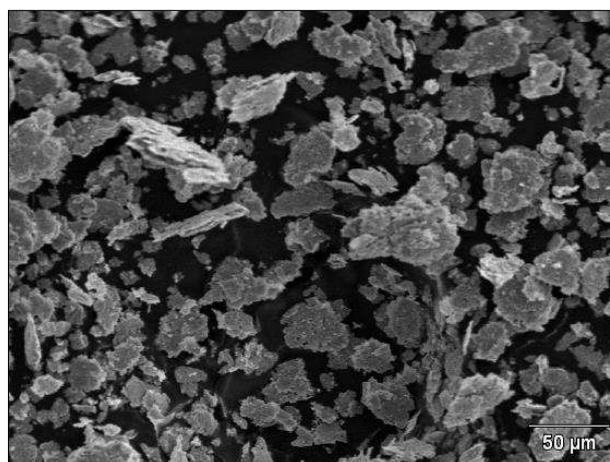


Figura 40 – Pó de Cobre5%Cinzas leves após 356 horas de moagem em moinho de bolas

A Figura 40 apresenta que grande parte das partículas de cobre permaneceu nas dimensões em que estavam após 100 e 200 horas de moagem, no entanto nota-se o surgimento de algumas partículas com dimensões ainda menores, de aproximadamente $2\mu\text{m}$, que se desprenderam das bordas das partículas maiores, que claramente estão apresentando bordas irregulares e danificadas devido ao impacto entre as esferas do moinho.

Outra etapa de moagem estudada neste trabalho foi realizada em moinho planetário, configurando uma moagem de alta energia. A Figura 41 apresenta uma redução considerável no tamanho das partículas de pó de cobre com 5% de cinzas leves, com 16 horas de moagem.

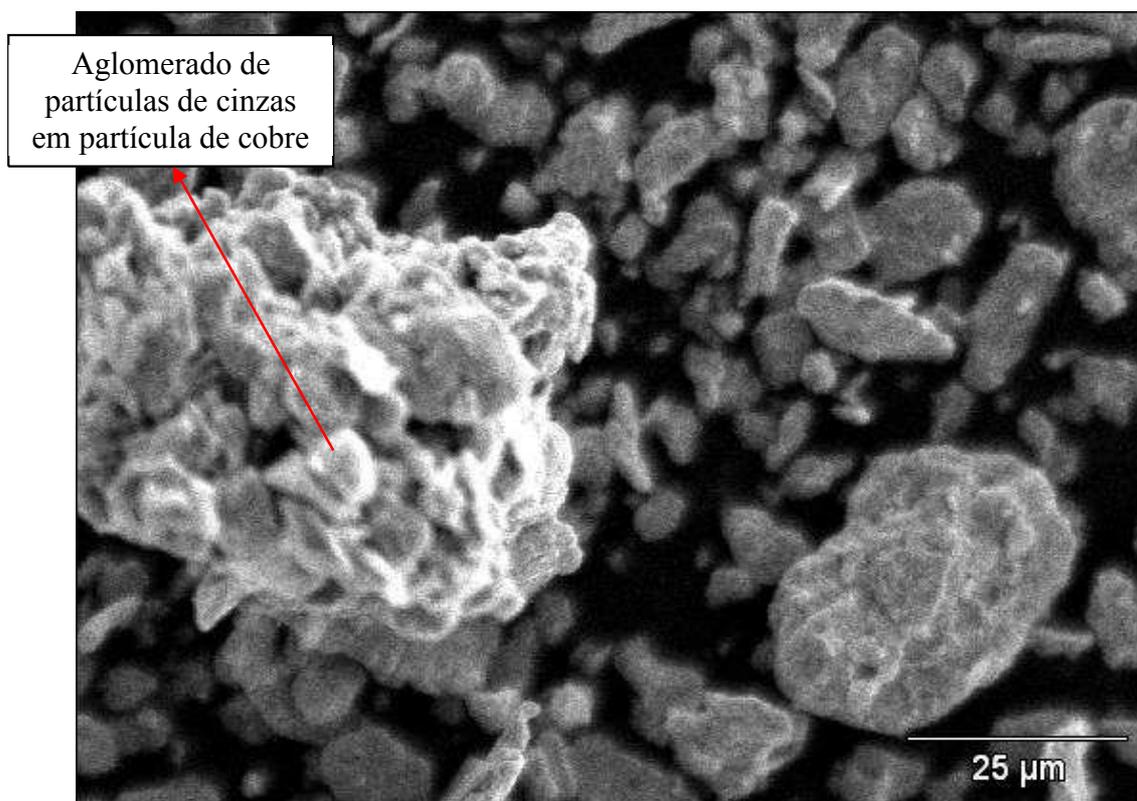


Figura 41 – Pó de Cobre5%Cinzas leves após moagem de alta energia

A imagem com aumento de 1100 X do pó obtido após moagem de alta energia, exibida na Figura 41, demonstra que as partículas de cobre ficaram com tamanho entre 5 e $30\mu\text{m}$ e as partículas de cinzas entre 2 e $5\mu\text{m}$, como no processo de moagem por moinho de bolas durante 100 horas.

Após a compactação e sinterização dos corpos de prova foram selecionadas as amostras que apresentaram as melhores condições de dureza nas diferentes condições do processamento dos pós e submetidas ao ensaio de MEV.

A Figura 42 apresenta imagens em diferentes aumentos da amostra sinterizada obtida após mistura simples de pós e que apresentou a maior dureza.

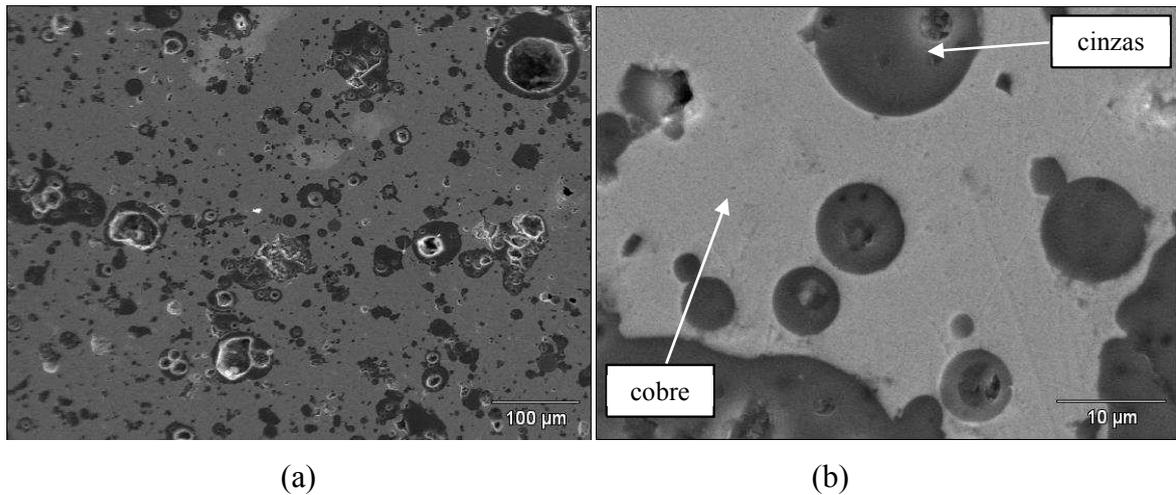


Figura 42 – Amostra sinterizada obtida após mistura simples de pós. Aumentos de 200 X (a) e 2500 X (b)

Utilizando os pós obtidos após mistura simples em misturador não existe interação entre as cinzas e a matriz de cobre em peças sinterizadas, como pode ser visualizado claramente na Figura 42 (b).

A Figura 43 apresenta a imagem com aumento de 1000 X da amostra sinterizada obtida após moagem de pós por moinho de bolas e que apresentou a maior dureza dentre todas as amostras confeccionadas neste estudo.

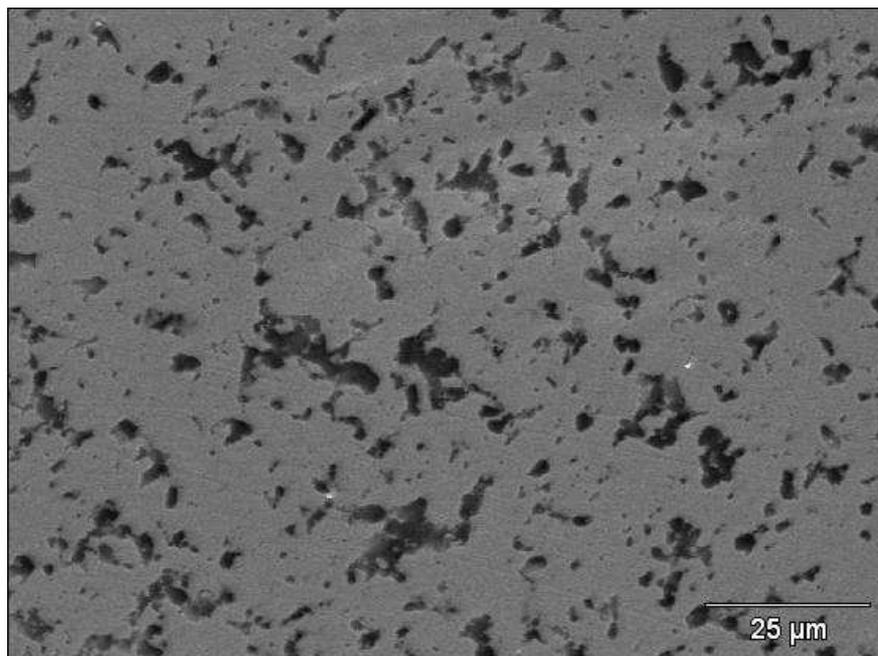


Figura 43 – Amostra sinterizada obtida após moagem dos pós por moinho de bolas. Aumento de 1000 X

Na amostra confeccionada com pós moídos em moinho de bolas durante 100h, observa-se que as cinzas interagiram com o cobre, perdendo seu formato esférico e tendo parte de seus elementos migrados para a matriz de cobre.

A Figura 44 apresenta a imagem com aumento de 700 X da amostra sinterizada obtida após moagem de alta energia de pós, durante 16 horas, que apresentou a maior dureza.

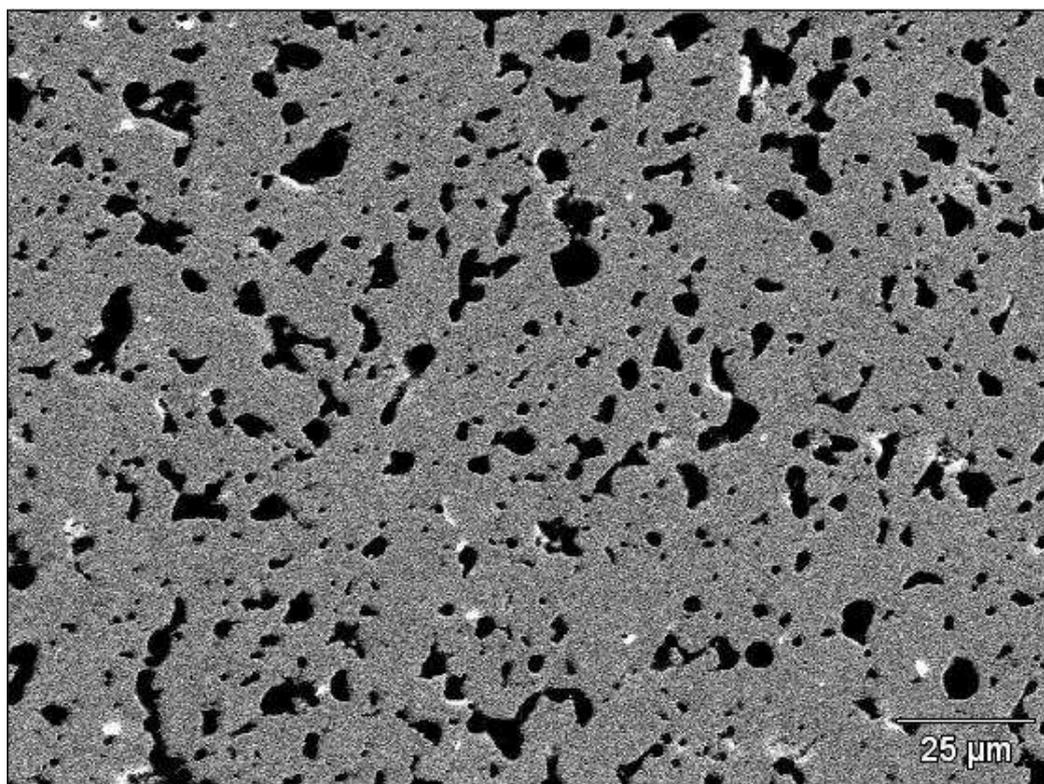


Figura 44 – Amostra sinterizada obtida após moagem de alta energia dos pós. Aumento de 700 X

Na amostra confeccionada após o processo de moagem em alta energia dos pós durante 16 horas, observa-se que houve interação entre as cinzas e o cobre, da mesma maneira que nas peças formuladas com pós moídos por moinho de bolas.

4.6 Análise via EDS do compósito de cobre com 5% de cinzas leves

Após a compactação e sinterização dos corpos de prova, foram selecionadas as amostras que apresentaram maiores durezas, nas diferentes condições do processamento dos pós e submetidas ao ensaio de EDS.

A Figura 45 apresenta os pontos avaliados no ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da peça confeccionada com pós obtidos através de mistura simples em misturador duplo “V”.

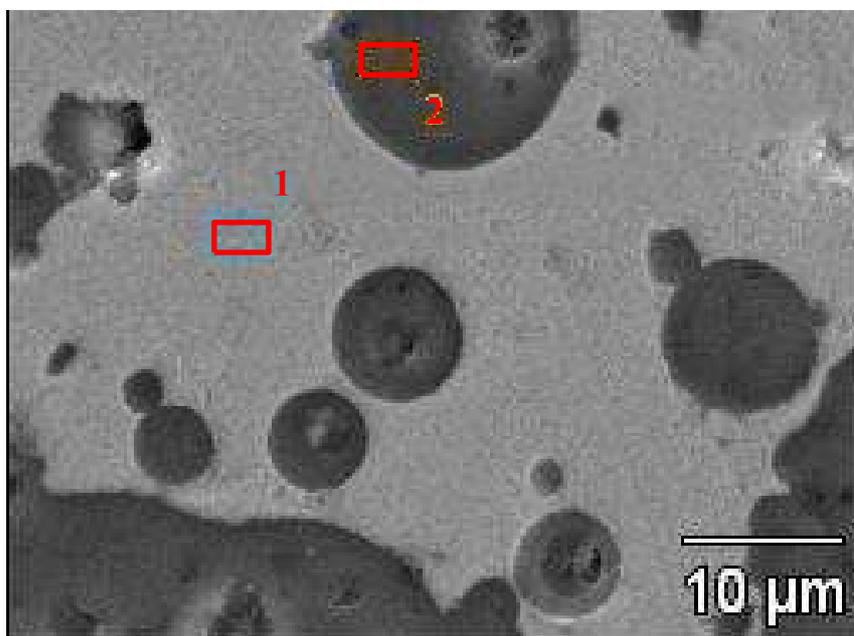


Figura 45 – Pontos quantificados pelo ensaio de EDS na amostra com pós de mistura simples.

Os elementos encontrados nos pontos apresentados pela Figura 45 da peça sinterizada, formulada com mistura simples de pós em misturador, estão descritos em percentual pela Tabela 18.

Tabela 18 – Composição química da amostra obtida após mistura simples de pós

Elemento	C(%)	O(%)	Al(%)	Si(%)	F(%)	Cu(%)
Ponto 1	-	-	-	-	11,79	88,21
Ponto 2	44,47	11,54	13,09	30,9	-	-

Ao analisar a composição dos pontos estudados na peça obtida após mistura simples de pós, verifica-se que não existe interação entre as cinzas e o cobre, pois não existe percentual algum dos elementos constituintes das cinzas nas regiões de cobre, nem mesmo percentuais de cinzas no cobre.

A Figura 46 apresenta os pontos avaliados no ensaio de EDS da peça confeccionada com pós obtidos através de moagem por moinho de bolas durante 100 horas.

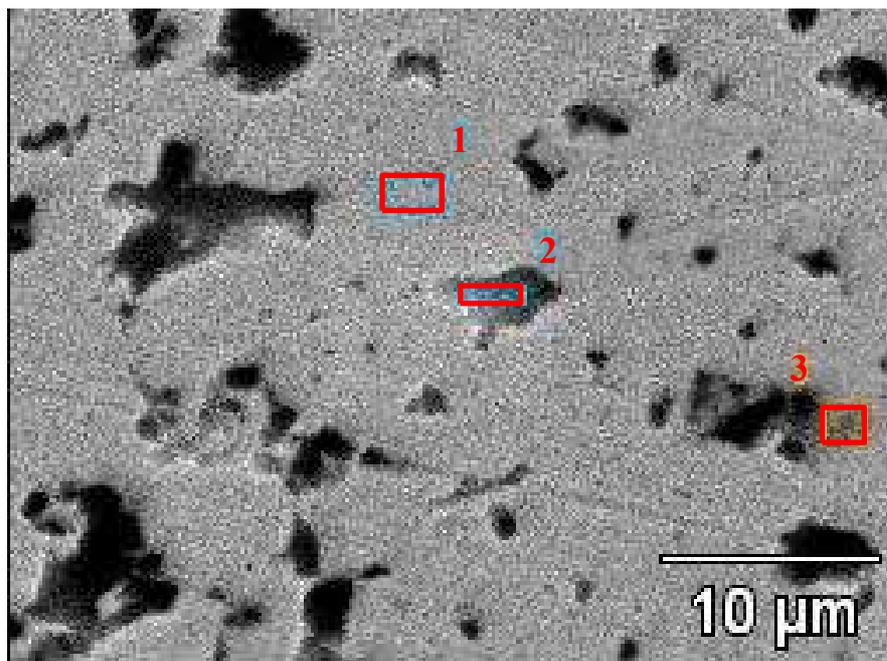


Figura 46 – Pontos analisados em EDS - amostra com pós de 100 horas de moagem em moinho de bolas.

Os elementos encontrados nos pontos marcados na Figura 46, estão descritos em percentual pela Tabela 19.

Tabela 19 – Composição química da amostra obtida após 100 horas de moagem de pós

Elemento	C(%)	K(%)	Al(%)	Si(%)	F(%)	Cu(%)
Ponto 1	30,27	-	0,25	0,12	10,11	59,25
Ponto 2	37,08	0,63	5,5	7,49	-	49,3
Ponto 3	-	-	3,33	11,1		85,57

Através da análise da composição química nos diferentes pontos de estudo da peça, pode-se notar que houve migração de cobre para dentro dos espaços que eram ocupados por grãos de cinzas, assim como a migração de alumínio e silício para as regiões de cobre. Nas regiões ao redor dos grãos de cinzas houve grande interação entre os elementos, onde se percebe elevados percentuais de cobre, alumínio e silício.

A Figura 47 apresenta os pontos avaliados no ensaio de EDS da peça confeccionada com pós obtidos através da moagem de alta energia durante 16 h.

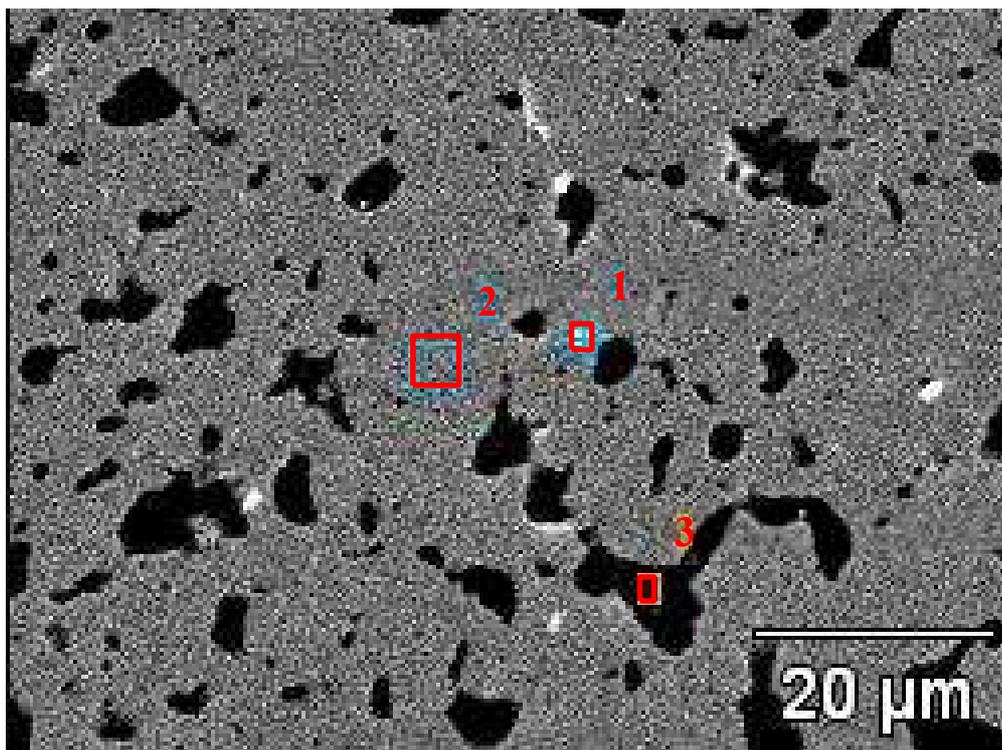


Figura 47 – Pontos analisados em EDS - amostra com pós de moagem de alta energia.

Os elementos encontrados nos pontos apresentados pela Figura 47, estão descritos em percentual pela Tabela 20.

Tabela 20 – Composição química da amostra obtida após moagem de alta energia dos pós

Elemento	C(%)	O(%)	F(%)	Al(%)	Si(%)	K(%)	Cu(%)
Ponto 1	49,80	-	9,29	0,47	0,92	-	39,52
Ponto 2	45,11	-	-	-	-	-	54,89
Ponto 3	58,62	9,15	-	3,98	20,51	1,61	6,13

Através da análise da composição química nos diferentes pontos estudados da amostra obtida por moagem de alta energia de pós, pode-se notar que, assim como na amostra obtida por moagem em moinho de bolas, houve migração de cobre para dentro dos espaços que eram ocupados por grãos de cinzas. Porém o alumínio e o silício que saíram das cinzas não interagiram uniformemente na matriz de cobre, mas se uniram ao cobre em pontos concentrados na peça (os pontos brancos que podem ser vistos na Figura 47).

4.7 Resistividade elétrica das amostras de cobre com 5% de cinzas leves

Para o ensaio de resistividade elétrica foram confeccionados corpos de prova em formato de anéis nas mesmas condições de preparo que os corpos de prova cilíndricos que apresentaram durezas superiores a 120 HV.

Os resultados obtidos nos testes de resistividade para o compósito obtido por moagem de alta energia e moagem por moinho de bolas apresentaram resistividade nula. Este resultado demonstra que a moagem por moinho de bola ou de alta energia é eficiente para manter as propriedades elétricas do cobre, em MMCs de cobre com até 5% de reforço com cinzas leves. Quando se compara estes resultados aos publicados em literaturas sobre compósitos CuAl_2O_3 , com percentuais de até 2,5% de alumina, nota-se a superioridade do compósito Cu5\%Cinzas leves . A literatura apresenta condutividade variando entre 30 e 36% IACS para compósitos CuAl_2O_3 [19, 100, 101], enquanto o compósito gerado por Cobre-Cinzas leves manteve 100% da condutividade do cobre.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos e discutidos pode-se concluir que compósitos de Cobre-Cinzas leves obtidos a partir da mistura simples de pós apresentam valores inferiores à 89HV de dureza, sendo o valor inferior ao do cobre puro (95 HV para composição de 99,9%Cu [98]), independente dos percentuais de cinzas leves acrescidos ao cobre. Os estudos com mistura simples de pós de cobre com cinzas leves mostraram que, devido à falta de afinidade química entre o cobre e os aluminosilicatos e óxidos contidos nas cinzas leves, não ocorre difusão entre estes materiais.

Para peças obtidas após o processo de mistura simples de pós, as pressões de compactação a partir de 400MPa apresentam maior densificação do que peças compactadas por valores inferiores a 400MPa de pressão de compactação. Sendo assim pode-se afirmar que ocorre a estabilidade da densidade a verde. A partir de uma pressão de 600MPa na composição com 20% de cinzas leves com cobre, os corpos de prova sofreram microtrincas horizontais devido a excesso de pressão na compactação e devido ao maior empacotamento das partículas do pó e após a sinterização fraturaram.

A partir da análise metalográfica das peças obtidas após mistura simples dos pós, verificou-se elevada porosidade e que não existe interação entre o cobre e as cinzas.

As amostras obtidas após a mistura simples de pós foram submetidas a ataque químico com HNO_3 50% H_2O , o que confirmou a não inclusão das cinzas ao cobre. O ataque químico revelou que a estrutura micrográfica do cobre permanece inalterada, ou seja, sem interação química com nenhum elemento, pois o ataque revelou microestrutura dentrítica, que é a microestrutura do cobre puro eletrolítico.

Através do ensaio de dureza pode-se afirmar que os maiores resultados para esta propriedade mecânica em peças que partiram da mistura simples de pós apresentam-se na composição de cobre com 5% de cinzas leves, compactada a 600 MPa e sinterizada a temperatura de 900 °C em atmosfera de gás marrom, atingindo a dureza de 89 HV. Através da análise dos resultados de dureza percebe-se que trabalhar com percentuais superiores a 5% de cinzas seria inviável para o compósito cobre-cinza.

As peças sinterizadas obtidas após a moagem simples do pó de cobre com 5% de pó de cinzas leves por moinho de bolas apresentam, via análise por EDS, que existe interação química pelo cobre e as cinzas leves, pois a composição química demonstra migração de cobre para dentro dos espaços que eram ocupados por grãos de cinzas assim como a migração de alumínio e silício para as regiões de cobre. Nas regiões ao redor dos grãos de

cinzas houve grande interação entre os elementos, onde se percebe elevados percentuais de cobre, alumínio e silício.

As peças sinterizadas obtidas após a moagem simples do pó de cobre com o pó de cinzas leves apresentam dureza superior a peças de cobre puro. Para diferentes tempos de moagem, nota-se que a dureza das peças após o tempo de 100 horas de moagem apresenta o maior valor de dureza (122 HV). As peças que utilizaram pós submetidos a tempos superiores a 100 horas de moagem em moinho de bolas apresentaram dureza inferior a 122HV.

Partindo do método de moagem simples dos pós, compactação de amostras à 600 MPa, efetuando um pré-aquecimento de peças em atmosfera ambiente, sinterizando as amostras em atmosfera de gás marrom à 900 °C é possível atingir a dureza média de 122 HV, superando a dureza de peças de cobre puro (95 HV) e se equivalendo a peças obtidas pelo MMC de cobre com até 4,1% de alumina (que apresentam durezas entre 117 HV e 137 HV [18]), sendo uma justificativa para a produção deste compósito.

Ao iniciar o processo de M/P pelo método de moagem de alta energia dos pós, a análise da composição química de peças demonstra que o cobre e as cinzas também possuem interação química após este processo, pois a análise via EDS apresentou cobre dentro dos espaços que eram ocupados por grãos de cinzas. No entanto, o alumínio e o silício que saíram das cinzas não interagiram uniformemente na matriz de cobre, mas interagiram ao cobre em pontos concentrados na peça.

A moagem de alta energia dos pós, durante 24 horas em moinho planetário, peças com a composição de Cobre5%Cinzas leves atingem a dureza de 121 HV. Este resultado se equivale aos obtidos em peças cujos pós foram moídos durante 100 horas em moinho de bolas e reduzindo o tempo de moagem em 76 horas. Ambos os processos de moagem com 5% de cinzas leves garantem maior dureza ao cobre puro.

Para a melhoria da dureza em peças obtidas pelo compósito Cobre5%Cinzas leves é necessário um pré-aquecimento das peças ao patamar de 300 °C. Isto favorece a eliminação de elementos de baixo ponto de fusão e na redução da porosidade das peças, consequentemente aumentando a dureza após a eliminação de óxidos prejudiciais para um pré-ligamento dos materiais.

Em relação à atmosfera utilizada durante a sinterização, pode ser afirmado que atmosferas redutoras de óxidos são responsáveis por aumentar a dureza das peças, comparadas a amostras sinterizadas em atmosferas inertes.

A resistividade do compósito Cobre5%Cinzas leves após a moagem dos pós por alta energia ou em moinho de bolas, é excelente para a produção de peças que necessitam condutividade elétrica, pois o resultado da resistividade foi nulo nas peças obtidas em ambos os métodos de moagem. Sendo a resistividade nula, este valor representa uma condutividade de 100% para o compósito Cobre5%Cinzas leves. O teor de 5% de cinzas leves não afeta a condutividade do cobre, justificando o estudo e a possível produção deste compósito para peças condutoras elétricas.

Além de não exercer resistência à corrente elétrica nas peças sinterizadas, as cinzas leves, em 5% na mistura com cobre eletrolítico, conferem um aumento na dureza em relação a peças sinterizadas de cobre puro. Salienta-se que todos estes benefícios são alcançados utilizando 5% de resíduos termoelétricos na composição total de peças de cobre, o que consequentemente acarreta na redução dos custos com a matéria prima de cobre, podendo substituir o cobre puro pelo compósito cobre-cinzas leves apresentado neste trabalho.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Pesquisar e analisar compósitos de Cobre-Cinzas com menores percentuais de cinzas, pois os maiores valores de dureza foram adquiridos com o menor percentual de cinzas estudados;
- 2- Pesquisar as influências das condições de sinterização no compósito Cobre-Cinzas;
- 3- Estudar o compósito Cobre – Cinzas – Ferro, pois são elementos que interagem entre si;
- 4- Estudar o compósito Cobre-Cinzas através de outros processos de fabricação mecânica para verificar a possibilidade de melhoria em propriedades mecânicas para o compósito;
- 5- Estudar possíveis compósitos de cinzas a outros metais para verificar a possibilidade de interação química;
- 6- Analisar o comportamento do compósito de cobre com 5% de cinzas leves com diferentes condições de sinterização e pré-aquecimento;
- 7- Analisar o compósito com maior percentual de cinzas e partir pelo método de moagem de alta energia e moagem simples;
- 8- Estudar a influência dos tempos de moagem de alta energia para as propriedades mecânicas do compósito Cobre-Cinzas leves;
- 9- Utilizar o compósito Cu5%Cinzas leves na aplicação em campo como condutores elétricos e analisar seu desempenho;
- 10- Pesquisar as propriedades térmicas do compósito Cobre-Cinzas leves;
- 11- Analisar a redução de custos para a fabricação de peças sinterizadas de MMCs com matriz de Cobre e reforço de resíduos termoelétricos comparados a peças de cobre puro.

REFERÊNCIAS

1. BAGNATO, O. R. **Projeto sobre compósito Cu/Al₂O₃**. Documentação Interna, LNLS, 2006.
2. MOUSTAFA, S. F. HAMID, Z. A. ELHAY, A. M. **Copper matrix SiC and Al₂O₃ particulate composites by powder metallurgy technique**. Materials Letters, vol. 53, p. 224–229, 2002.
3. CHEN, S. CHIN, B. A. **Low activation braze joint of dispersion strengthened copper**. Journal of Nuclear Materials, vol. 225, p. 132 – 136, 1995.
4. TAVARES A. C. MARTINS, V. WERMUTH, D. P. MARIOT, P. AGUSTINI, R. SCHAEFFER, L. **Obtenção de cermets por metalurgia do pó convencional a partir da utilização das cinzas da queima de carvão mineral**. Anais do 68º Congresso ABM Internacional, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2013.
5. KERSTNER, K. E. MARIOT, P. MARTINS, V. ANDO, JR. O. BROGNI, A. SCHAEFFER, L. **Estudo da utilização de cinzas da combustão de carvão no processo de fabricação de componentes por metalurgia do pó convencional**. Anais do 66º Congresso Internacional da ABM, p. 2989 – 2999, 2011.
6. MOTTA, C. A. O. **Utilização da cinza mosca leve ligado ao compósito Ferro-Cobre-Grafita em processo de metalurgia do pó**. Dissertação para obtenção do título de mestre. Área de concentração: Processos de Fabricação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2014.
7. BROLESI, T. M. **Influência da Moagem de Alta Energia da cinza pesada obtida da queima em termoelétrica no compósito Cinza-20Fe**. Dissertação para obtenção do título de mestre. Área de concentração: Processos de Fabricação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2013.
8. BROGNI, A. **Obtenção de cermet por metalurgia do pó convencional a partir da utilização da cinza leve proveniente da queima do carvão mineral em termoelétrica**. Dissertação para obtenção do título de mestre. Área de concentração: Processos de Fabricação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2013.
9. LEVANDOWSKI, J. KALKREUTH, W. **Chemical and petrographical characterization of feed coal, fly ash and bottom ash from the Figueira Power Plant**. Paraná, Brazil. Int. J. Coal Geol., v. 77, p. 269-281, 2009.

10. BORMA, L. D. S. MENDONÇA, R. G. SOUZA, V. P. SOARES, P. S. M. **Utilização de cinza no contexto da reabilitação de áreas de mineração de carvão.** Contribuição Técnica elaborada para o V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Porto Alegre - RS, p. 9, 2003. Disponível em <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2003-025-00.pdf>>. Acesso em 20 de Novembro de 2014.
11. PANDEY, A. B. **Metallic Matrices.** ASM International Handbook, vol. 21, p. 380-382, 2001.
12. TJONG, S. C. MA, Z.Y. **Microstructural and mechanical characteristics of in-situ metal matrix composites.** Materials Science and Engineering, Vol. 29, p. 49-113, 2000.
13. VAUCHER, S. BEFFORT, O. **Bonding and interface formation in Metal Matrix Composites.** MMC-Assess Thematic Network, EMPA-Thun, vol. 9, ed. MMC-Assess Consortium, 2001.
14. TOLLE, T. B. HUNT, W. H. **Introduction to Applications.** ASM International Handbook, p. 2321-2524, 2001.
15. WANGA, H. ZHANGA, R. HUA, X. WANGB, C. A. HUANG, Y. **Characterization of a powder metallurgy SiC/Cu–Al composite.** Materials Processing Technology, n. 197, p. 43-48, 2008.
16. DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy.** Vol. 3, ed. McGraw- Hill, London, United Kingdom, 1988.
17. DONNELL, G. O. LOONEY, L. **Production of aluminium matrix composite components using conventional PM technology.** Materials Science and Engineering: A, vol. 303, p. 292-301, 2001.
18. HWANG, S. J. LEE, J. **Mechanochemical synthesis of Cu–Al₂O₃ nanocomposites.** Materials Science and Engineering A, vol. 405, Ed. Elsevier, p. 140–146, 2005.
19. ANĐIĆ, Z. KORACĆ, M. TASIĆ, M. KAMBEROVIĆ, Ž. RAIĆ, K. **Synthesis and sintering of cu-al₂o₃ nanocomposite Powders produced by a thermochemical route.** Metalurgija-Journal of Metallurgy, vol. 13, p. 71, 2010.
20. SIVASANKARAN, S. SIVAPRASAD, K. NARAYANASAMY, R. LYER, V.K. **An investigation on flowability and compressibility of AA 6061 100– x-x wt.% TiO₂ micro and nanocomposite powder prepared by blending and mechanical alloying.** Powder Technology, vol. 201, p. 70-82, 2010.
21. EFE, G. C. ALTINSOY, I. YENER, T. IPEK, M. ZEYTIN, S. BINDAL, C. **Characterization of cemented Cu matrix composites reinforced with SiC.** VACUUM, vol. 85, p. 643-647, 2010.

22. MIRACLE, D. B. **Fabrication and Characterizations of Mechanical Properties of Al-4.5%Cu/10TiC Composite by In-situ Method.** Composites Science and Technology. Vol. 65, p. 2526-2540, 2005.
23. LLOYD, D.J. **Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites.** International Materials Reviews, rev. 39, p. 1-23, 1994.
24. KORAC, M. KAMBEROVIC, Z. TASIC, M. GAVRILOVSKI, M. **Nanocomposite powders for new contact materials based on copper and alumina.** Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, vol. 14, p. 215-218, 2008.
25. EFE, G. C. ZEYTIN, S. BINDAL. C. **The effect of SiC particle size on the properties of Cu-SiC composites.** Materials & Design, Vol. 36, p. 633-639, 2012.
26. TONG, W. RAVICHANDRAN, G. **Effective elastic moduli and characterization of a particulate metal-matrix composite with damaged particles.** Composites Science and Technology, volume 52, Issue 2, p. 247–252, 1994.
27. DUNKLEY, J. **MIM - A global perspective.** Powder Metallurgy, v.43, n.4, p.296-298, 2000.
28. GALIOTTO, A. **Estudo da sinterabilidade de materiais ferrosos contendo elevados teores de sulfetos como aditivo.** Dissertação para obtenção do título de mestre. Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais. Pós Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC, Florianópolis, SC, 2005.
29. THÜMMLER, F. OBERACKER, R. **An introduction to powder metallurgy.** Cambridge, Great Britain: The institute of Materials, p. 1 a 5, 1993.
30. TRUDEL, Y. **Introduction to Metal Powder. Production and Characterization.** ASM Metals Handbook. Vol. 7 - Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 9ª Edition, p. 83-88, 1998.
31. PÓ, GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO. **A Metalurgia do Pó: Alternativa econômica com menor impacto ambiental.** Grupo setorial de Metalurgia do Pó, Rio de Janeiro, Brasil, p. 37-100, 2009.
32. SANDEROW, H. **Management & Engineering Technologies - Powder Metallurgy Methods and Design.** ASM Metals Handbook v7 - Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 9ª Edition, p.23-24, 1998.
33. SURYANARAYANA, C. IVANOV, E. BOLDYREV, V.V. **The science and technology of mechanical alloying.** Materials Science and Engineering, Elsevier Science B.V. 2001.

34. SALGADO, L. **Processamento da liga Ferro-Níquel-Cobre-Molibdênio por moagem de alta energia.** Tese para obtenção do título de doutor. Área de concentração: Ciência na área de Tecnologia Nuclear – Aplicações, Pós-graduação no Instituto de pesquisa energética associado a USP. São Paulo SP, Brasil. 2002.
35. ARNDT, M. C. **Obtenção de material magnético macio de Fe-Si pelo processo de injeção de pós metálicos.** Dissertação para obtenção do título de mestre. Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais. Pós-graduação em engenharia metalúrgica. UFRGS, Porto Alegre, RS, 2002.
36. GOMES DE BRITO, F. I. MEDEIROS, K. F. LOURENÇO, J. M. **Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó.** Holos, Vol. 3, 2003.
37. HÖGANÄS. **Höganäs Handbook for Sintered Components 5 – Machining Guidelines.** Höganäs AB, p. 18, 2004.
38. CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó.** São Paulo, Brasil: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 4ª Ed, p. 183, 2001.
39. MORO, N. AURAS, A. P. **Processos de Fabricação – metalurgia do pó e o futuro da indústria.** Florianópolis: Centro federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007.
40. IAE. **Instituto de Aeronáutica e Espaço.** Disponível em: <http://www.iae.cta.br/site/page/view/pt.labs.amr_lcmp.html> Acesso em 20 de Novembro de 2014.
41. SILVA, A. G. P. JÚNIOR, C. A. **A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização.** Cerâmica, vol. 44, São Paulo, p. 290, 1998.
42. BRITO, F. I. MEDEIROS, K. F. LOURENÇO, J. M. **Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó.** Holos, vol. 3, p. 204-211, 2007.
43. FERREIRA, J. M. G. C. **Tecnologia da pulverometalurgia.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
44. SANTOS, A. M. MALISKA, A. N. KLEIN, W. RISTOW, JR. MUZART, J. L. R. **Debinding of injected parts using an abnormal glow discharge.** Materials Science and Engineering, Vol. 407, p. 71-76, 2005.
45. GERMAN, R. M. **Powder Metallurgy Science.** Metal Powder Industries Federation. 2nd. s.l. Princeton, 1994.
46. KIM, K. HYEONG, C. CHUL-JIN, Y. BYONG, T. L. **Fabrication and material properties of Powder injection molded Fe sintered bodies using nano Fe powder.** Materials Letters. Volume 61, Issues 4–5, p. 1218–1222, 2007.

47. KNEWITZ, F. L. LUNA, W. H. D. ROCHA, A. S. SCHAEFFER, L. **Estudo comparativo de amostras de NiTi produzidas por metalurgia do pó.** Revista Unisinos - Estudos tecnológicos em engenharia, vol. 4, n° 1, p. 44-54, São Leopoldo, RS, Brasil, 2008.
48. CASTRO, A. L. **Avaliação de investimento de capital em projetos de geração termoeétrica no setor elétrico brasileiro usando teoria das opções reais.** Dissertação de mestrado apresentado para o Departamento de Engenharia Industrial Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2000.
49. IEA. **International Energy Agency.** Disponível em: <<http://www.iea.org>> Acesso em 20 de Novembro de 2014.
50. WCI - World Coal Institute. **The Coal Resource: a Comprehensive Overview of Coal.** London, 2005. Disponível em <<HTTP://www.worldcoal.org>> Acesso em 20 de Novembro de 2014.
51. BORMA, L. D. S. MENDONÇA, R. G. SOUZA, V. P. SOARES, P. S. M. **Utilização de cinza no contexto da reabilitação de áreas de mineração de carvão.** Contribuição Técnica elaborada para o V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Porto Alegre - RS, p. 3, 2003. Disponível em <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2003-025-00.pdf>>. Acesso em 20 de Novembro de 2014.
52. ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** p. 137, 2008.
53. CARVALHO, T. E. M. **Adsorção de corantes aniônicos de solução aquosa em cinza leve de carvão e zeólita de cinza leve de carvão.** Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais. IPEN, São Paulo, 2010.
54. INADA, M. EGUCHI, Y. ENOMOTO, N. HOJO, J. **Synthesis of zeolite from coal fly ash with different silica-alumina composition.** Fuel, vol. 84, p. 299-304, 2005.
55. JHA, V. K. MATSUDA, M. MIYAKE, M. **Resource recovery from coal fly ash waste: an overview study.** Journal of the Ceramic Society of Japan. vol. 116, n. 2, p. 167–175, 2008.
56. FERRET, L. S. **Zeólitas de Cinzas de Carvão: Síntese e uso.** Tese de Doutorado apresentada na Universidade Federal do Rio Grande Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, Porto Alegre, 2004.
57. POLIC, P. S. ILIC, M. R. POPOVIC, A. R. **Environmental impact assessment of lignite fly ash and its utilization products as recycled hazardous wastes on surface and ground water quality.** Springer-Verlag. The handbook of environmental chemistry, Berlin, n. 5, vol. 2, p. 64, 2005.

58. KLYOSOV, A. A. **Wood-plastic composites**. John Wiley & Sons, p. 148, 2007. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470165935.fmatter/pdf>> Acesso em 20 de Novembro de 2014.
59. FISHER, G. L. PRENTICE, B. A. SILBERMAN, D. ONDOV, J. M. BIERMANN, A. H. RAGAINI, R. C. MCFARLAND, A. R. **Physical and morphological studies of size-classified coal fly ash**. Environ. Sci. Technol., vol. 12, p. 447-451, 1978.
60. CHIES, F. SILVA, N. I. W. ZWONOK, O. **Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão**. Coletânea Habitar, vol. 4, Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, Porto Alegre, RS, p. 218 – 239, 2003.
61. VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado apresentada para Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, 1999.
62. KREUZ, A. L. **Utilização de cinzas pesadas de termelétricas na substituição de cimento e areia na confecção de concretos**. Dissertação de Mestrado apresentada na Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2002.
63. MANZ, O. E. **Worldwide production of coal ash and utilization in concrete and other products**. Fuel, v. 76, n. 8, p. 691-696, 1997.
64. KAYALI, O. HAQUE, M. N. ZHU, B. **Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete**. Cem. Concr. Compos., vol. 25, p. 207-213, 2003.
65. MALHOTRA, V. M. VALIMBE, P. S. WRIGHT, M. A. **Effects of fly ash and bottom ash on the frictional behavior of composites**. Fuel, vol. 81, p. 235-244, 2002.
66. PANAGAPKO, D. **Cement**. Canadian Minerals Yearbook, 2004. Disponível em: <<http://www.nrcan.gc.ca/mms-smm/busi-indu/cmy-amc/content/2004/17.pdf>> Acesso em 20 de Novembro de 2014.
67. GUPTA, S. K. TEWARI, A. SRIVASTAVA, R. MURTHY, R. C. CHANDRA, S. **Potential of Eisenia foetida for sustainable and efficient vermicomposting of fly ash**. Water Air Soil Pollut., vol. 163, p. 293–302, 2005.
68. DWIVEDI, S. SRIVASTAVA, S. MISHRA, S. DIXIT, B. KUMAR, A. TRIPATHI, R. D. **Screening of native plants and algae growing on fly-ash affected area near national thermal power corporation, Tanda, Uttar Pradesh, India for accumulation of toxic heavy metals**. J. Hazard. Mater., vol. 158, p. 359–365, 2008.

69. CAO, D. SELIC, E. HERBELL, J-D. **Utilization of fly ash from coal-fired power plants in China.** J. Zhejiang Univ. Sci. A, vol. 9, n. 5, p. 681-687, 2008.
70. SOUZA, V. P. NASCIMENTO, M. COELHO, C. F. **Adsorção de metais pesados em zeólita sintetizada a partir do tratamento alcalino hidrotérmico de cinza de carvão.** Anais do XXI encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa, Natal, RN, 2005, Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2005-111-00.pdf>> Acesso em 20 de Novembro de 2014.
71. HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante, cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese de Doutorado apresentada para a Universidade de São Paulo, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil e Urbana, São Paulo, 2008.
72. FUNGARO, D. A. IZIDORO, J. C. **Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão.** Quím. Nova, vol. 29, n. 4, p. 735-740, 2006.
73. MORENO, N. QUEROL, X. AYORA, C. PEREIRA, C. F. JURKOVICOVA, M. J. **Utilization of zeolites synthesized from coal fly ash for the purification of acid mine waters.** Environmental Science & Technology, vol. 35, p. 3526-3534, 2001.
74. QUEROL, X. ALASTUEY, A. LÓPEZ-SOLER, A. PLANA, F. ANDRÉS, J. M. JUAN, R. FERRER, P. RUIZ, C. R. **A fast method for recycling fly ash: microwave – assisted zeolite synthesis.** Environmental Science & Technology, vol. 31, p. 2527-2533, 1997.
75. HENMI, T. **Synthesis of hydroxy-sodalite (“zeolite”) from waste coal ash.** Soil Sci. Plant Nutr., vol. 33, p. 517-522, 1987.
76. HÖLLER, H. WIRSCHING, U. **Zeolite formation from fly ash.** Fortschr. Miner, vol. 63, n. 1, p. 21-43, 1985.
77. MARTINS, J. L. **Aproveitamento de cinza de carvão mineral na agricultura.** Tese de Doutorado apresentada para a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, Porto Alegre, 2001.
78. GOSWAMI, D. DAS, A. K. **Preconcentration and recovery of uranium and thorium from Indian monazite sand by using a modified fly ash bed.** J. Radioanal. Nucl. Chem., vol. 258, n. 2, p. 249-254, 2003.
79. LEIVA, C. VILCHES, L. F. PEREIRA, C. F. QUEROL, X. VALE, J. **Use of zeolitised fly ashes in fire resistance plates.** In: The World of Coal Ash Conference, May 7-10, 2007, Covington, Kentucky. Disponível em:

<<http://www.worldofcoalah.org/2007/ashpdf/133leiva.pdf>> Acesso em 20 de Novembro de 2014.

80. ZHOU, H. M. LUO, Y. YU, J. G. QIAO, X. C. **Feasibility of recovery alumina from coal fly ash.** In: World Coal Ash Conference, May 4-7, 2009, Lexington, Kentucky. Disponível em: <<http://www.worldofcoalah.org/2009/ashpdf/a013-qiao2009.pdf>> Acesso em 20 de Novembro de 2014.

81. MOTTA, C. A. O; SOUZA, J; SCHAEFFER, L. **Análise da aplicabilidade da cinza leve em balanço com o compósito ternário FE-CU-C: uma aplicação voltada ao design for environment.** Anais CD. 10º Encontro de Metalurgia do Pó / 4ª COMEP - Conferência Internacional de Metalurgia do Pó – Brasil – RS. UFRGS/LdTM – Porto Alegre – RS, Brasil, 2013.

82. WERMUTH, D. P. DA SILVA, M. M. MARTINS, V. ARENHARDT, S. L. TAVARES, A. C. SCHAEFFE, L. **Estudo das Propriedades Físicas do Compósito “Cobre-Cinza Leve” obtido por Metalurgia do Pó.** Anais CD. 11º Encontro de Metalurgia do Pó / 5ª COMEP - Conferência Internacional de Metalurgia do Pó – Brasil – RS. UFRGS/LdTM, Porto Alegre, RS, Brasil, 2014.

83. NIKOLIĆA, V. KOMLJENOVIĆA, M. BAŠČAREVIĆA, Z. MARJANOVIĆA, N. MILADINOVIĆB, Z. PETROVIĆC, R. **The influence of fly ash characteristics and reaction conditions on strength and structure of geopolymers.** Construction and Building Materials, Volume 94, p. 361–370, 2015.

84. VAN JAARSVELD, J. G. S. VAN DEVENTER, J. S. J. LUKEY, G. C. **The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers.** Materials Letters, Vol. 57, p. 1272–1280, 2003.

85. BAGNATO, O. R. FRANCISCO, F. R. GABOS, C. B. PARDINE, C. **Brasagem Metal/Metal e Metal/Cerâmica para Fabricação dos Guias de Onda e Monitores de Potência do LINAC do Anel no LnlS.** Anais do XXVII Congresso de Aplicações de Vácuo na Ciência e na Indústria, Itatiba, SP, 2006.

86. BAGNATO, O. R. VALENTE, J. E. FRANCISCO, F. R. **Efeito da Temperatura de Brasagem na Difusão de Ag em Cu.** Anais do XV CBECIMAT, Natal, RN, 2002.

87. GOMES, M. R. BRESCIANI FILHO, E. **Propriedades e Usos de Metais Não-ferrosos.** ed. ABM, capítulo 3, São Paulo, 1987.

88. INFOMET. Disponível em <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-assunto.php?codSecao=12>> Acesso em 20 de Novembro de 2014.

89. ANDRADE, M. L. A. VIEIRA, J. R. M. CUNHA, L. M. S. KELLER, M. C. FULDA, R. S. **Industria de Cobre – Área de operações industriais**. BNDS, 1997.
90. BRUTT, **Industria Metalúrgica. Produtos**. Disponível em <<http://www.brutt.com.br/cobre.html>> Acesso em 20 de Novembro de 2014.
91. RAJKOVIC, V. BOZIC, D. STASIC, J. WANG, H. JOVANOVIC, M. T. **Processing, characterization and properties of copper-based composites strengthened by low amount of alumina particles**. Powder Technology, ed. Elsevier, n° 268, p. 392–400, 2014.
92. AHMARUZZAMAN, M. **A review on the utilization of fly ash**. Progress in Energy and Combustion Science, ed. Elsevier, n° 36, p. 327–363, 2010.
93. PÓ, GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO. **A Metalurgia do Pó: Alternativa econômica com menor impacto ambiental**. Grupo setorial de Metalurgia do Pó, Rio de Janeiro, p. 215, 2009.
94. RAJKOVIC, V. BOZIC, D. JOVANOVIC, M. T. **Effects of copper and Al₂O₃ particles on characteristics of Cu–Al₂O₃ composites**. Materials and Design 31, Ed. Elsevier, p. 1962–1970, 2010.
95. RAMOS, F. G. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona trifásica com ímãs de Nd-Fe-B e núcleo do estator a partir de Fe₂P sinterizado aplicado em aerogerador de 1kw**. Dissertação para obtenção do título de mestre. Área de concentração: Processos de Fabricação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2015.
96. SPIN, J. **Apostila Métodos de Metalografia: Teoria e Prática**. UFRGS, 2010.
97. MOHANTY, S. MOHANTY, A. **Synthesis & Characterization of copper-graphite metal matrix composite by Powder Metallurgy Route**. Trabalho de conclusão de curso para obtenção do título Metallurgical and Materials engineering. National Institute of Technology, Rourkela, 2012.
98. SOLGIM. **Ligas de Cobre**. Disponível em: <http://www.solgim.com.br/cobre_eletrolitico.php> Acesso em 20 de Novembro de 2014.
99. KANSERT. **Metrologia, Metalografia y Ensayos**. Disponível em: <http://www.kansert.es/index.php?option=com_wrapper&Itemid=30> Acesso em 20 de Novembro de 2014.
100. AMIRJAN, M. KHORSAND, H. SIADATI, M. H. FARSANI, R. E. **Artificial Neural Network prediction of Cu–Al₂O₃ composite properties prepared by powder metallurgy method**. Journal of materials researcher and technology, p. 351–355, 2013.

101. FATHY, A. EL-KADY, O. **Thermal expansion and thermal conductivity characteristics of Cu–Al₂O₃ nanocomposites.** *Materials and Design*, vol. 46, p. 355–359, 2013.
102. KORAC, M. KAMBEROVIC, Ž. ANĐIĆ, Z. FILIPOVIĆ, M. **Sintered Materials Based on Copper and Alumina Powders Synthesized by a Novel Method.** *Nanocomposites and Polymers with Analytical Methods*, Ed. In Tech, Cap. 8, p. 181-198, 2011.