

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DOS MATERIAIS - PPGE3M**

TATIANI MALGARISE BROLESI CISESKI

**INFLUÊNCIA DA MOAGEM DA CINZA PESADA OBTIDA DA QUEIMA EM
TERMOELÉTRICA NO COMPÓSITO CINZA-20Fe**

PORTO ALEGRE

2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DOS MATERIAIS - PPGE3M**

**INFLUÊNCIA DA MOAGEM DA CINZA PESADA OBTIDA DA QUEIMA EM
TERMOELÉTRICA NO COMPÓSITO CINZA-20Fe.**

TATIANI MALGARISE BROLESKI CISESKI

Engenheira Ambiental

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

Área de Concentração: Processos de Fabricação

PORTO ALEGRE

2013

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

Orientador: Prof. Dr Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng^o Adriano Michael Bernardin - UNESC

Prof. Dr. Eng^o Eduardo Osório – PPGE3M

Prof. Dr. Eng^o José Carlos Krause de Verney - ULBRA

Coordenador do PPG3M:

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

*Dedico esta dissertação
A minha mãe Ana Cirlete e a meu pai Valmor,
As minhas irmãs Carini e Juliani,
A meu cunhado Fernando e minha sobrinha Lara,
Em especial a meu esposo Sandrigo.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela força e coragem para sempre seguir.

Ao Professor Dr. Eng. Lirio Schaeffer, pela orientação, confiança e a grande ajuda, além da amizade e compreensão.

Ao Msc Vinícius Martins por todas as importantes sugestões, correções e principalmente todo apoio.

Ao incentivo e apoio de todos os amigos e colegas de trabalho, ao José Roberto Savi e Gilda pelo auxílio prestado e a todo pessoal do LAQUA / LAEC pela ajuda.

A minha mãe Ana Cirlete, meu pai Valmor, minhas irmãs Carini e Juliani, meu cunhado Fernando, minha afilhada Lara e meu querido esposo Sandrigo, por toda paciência e carinho recebidos por toda esta importante conquista.

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 que possibilitaram enriquecer minha experiência profissional.

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

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 Produção de cinzas a partir do carvão mineral	18
2.1.1 Criação da Usina Termoelétrica Jorge Lacerda.....	18
2.1.2 Processo de formação das cinzas leve e pesada.....	19
2.2 Cinza pesada	21
2.2.1 Características químicas da cinza pesada.....	21
2.2.2 Característica física da cinza pesada	23
2.2.3 Formas de destinação da cinza pesada	23
2.2.4 Usos da cinza pesada.....	24
2.3 Metalurgia do pó	25
2.3.1 Mistura e homogeneização de pós	26
2.3.2 Moagem.....	27
2.3.2.1 Variáveis do processo de moagem.....	28
2.3.2.1.1 Razão esfera / pó	28
2.3.2.1.2 Material e tamanho das esferas	29
2.3.2.1.3 Tempo de moagem	29
2.3.2.2 Tipos de moinho	30
2.3.2.2.1 Moinho de bolas planetário	31
2.3.3 Tipo de ligante – Ferro (Fe)	31
2.3.4 Compactação.....	33
2.3.5 Sinterização	34
2.3.5.1 Sinterização por fase líquida	35

2.4 Cermet	36
2.4.1 Definição.....	36
2.5.2 História dos Cermets	37
2.5.3 Características dos Cermets.....	38
2.5.4 Aplicações dos Cermets	40
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	42
3.1 Considerações Gerais.....	42
3.2 Matérias-primas	43
3.2.1 Cinza Pesada.....	43
3.2.2 Ferro	43
3.3 Moagem da cinza pesada	43
3.4 Determinação de tamanho de partícula por Difração a Laser da cinza pesada	44
3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da cinza pesada	44
3.6 Mistura e Compactação dos pós em matriz cilíndrica	45
3.6.1 Mistura dos pós.....	45
3.6.2 Compactação dos pós em matriz cilíndrica	45
3.6.1 Curva de compressibilidade do compósito Cinza-20Fe	45
3.7 Densidade Aparente do compósito Cinza-20Fe.....	46
3.8 Densidade a verde do compósito Cinza-20Fe	46
3.9 Sinterização do compósito Cinza-20Fe.....	46
3.9.1 Condições de sinterização.....	47
3.10 Caracterizações das amostras sinterizadas.....	47
3.10.1 Densidade do Sinterizado.....	48
3.10.2 Microdureza	48
3.10.3 Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 Determinação do efeito da moagem das cinzas	49
4.2 Preparação das composições	56
4.3 Densidade aparente.....	57
4.4.1 Curva de compressibilidade.....	57
4.5 Densidade a verde	58
4.6 MEV / EDS do Sinterizado	62
4.7 Densidade do Sinterizado	66

4.8 Microdureza	67
5 CONCLUSÕES	68
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXOS	76
APÊNDICES	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Linhas de pesquisa sobre cinzas realizadas e em andamento no Ldtm. ...	17
Figura 2: Vista geral do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda [4].....	18
Figura 3: Esquema de geração de energia térmica e produção das cinzas [7].....	19
Figura 4: Etapas do processo da Metalurgia do pó [26].	26
Figura 5: Evolução da microestrutura dos pós no processamento por moagem [24].	27
Figura 6: Modelo de moinho de bolas [23].	31
Figura 7: Estágios da movimentação das partículas na cavidade de uma matriz durante o processo de compactação [24].....	33
Figura 8: Etapas de funcionamento de um forno contínuo [26].	34
Figura 9: (A) Micrografia do compactado verde e (B) Micrografia do compactado sinterizado [17].	35
Figura 10: Estágios da sinterização por fase líquida [24].	35
Figura 11: Fluxograma do trabalho desenvolvido.....	42
Figura 12: Microscópio eletrônico de varredura (MEV).	44
Figura 13: Matriz cilíndrica de compactação.	45
Figura 14: Forno utilizado na sinterização.....	47
Figura 15: Micrografia da cinza com 2h de moagem.....	49
Figura 16: Distribuição de tamanho de partícula da cinza com 2h de moagem.	50
Figura 17: Micrografia da cinza com 4h de moagem.....	50
Figura 18: Distribuição de tamanho de partícula da cinza com 4h de moagem.	51
Figura 19: Micrografia da cinza com 8h de moagem.....	51
Figura 20: Distribuição do tamanho de partícula da cinza com 8h de moagem.	52
Figura 21: Micrografia da cinza com 16h de moagem.....	52
Figura 22: Distribuição de tamanho de partícula da cinza com 16h de moagem.	53
Figura 23: Micrografia da cinza com 32h de moagem.....	54
Figura 24: Distribuição de tamanho de partícula da cinza com 32h de moagem	54

Figura 25: Micrografia da cinza com 64h de moagem.....	55
Figura 26: Distribuição de tamanho de partícula da cinza com 64h de moagem	55
Figura 27: Influência do tempo de moagem no tamanho de partícula.....	56
Figura 28: Curva de Compressibilidade das misturas Cinza-20Fe.....	58
Figura 29: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 2h de moagem	59
Figura 30: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 4h de moagem	59
Figura 31: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 8h de moagem	60
Figura 32: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 16h de moagem	60
Figura 33: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 32h de moagem	61
Figura 34: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 64h de moagem	61
Figura 35: Micrografia da amostra sinterizada com 32h de moagem (750x).....	63
Figura 36: Espectro de EDS indicando ferro	63
Figura 37: Espectro de EDS indicando sílica e outros óxidos	64
Figura 38: Micrografia da amostra sinterizada com 32 h de moagem (1000x).....	64
Figura 39: Espectro de EDS da veia de Carbono.....	65
Figura 40: Amostras com 64 horas de moagem sinterizadas.....	65
Figura 41: Densidade do sinterizado da amostra de cinza com 32 horas de moagem	66
Figura 42: Microdureza das amostras com 32 horas de moagem.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química das cinzas pesadas americanas [7].	22
Tabela 2: Análise química em óxidos da cinza pesada de carvão mineral do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda [17].	22
Tabela 3: Comparação entre os tipos de moinho [24].	30
Tabela 4: Comparação de propriedades físicas do cermet (TiC) com o metal duro (WC) [38].	39
Tabela 5: Características do pó de Ferro.	43
Tabela 6: Resultados da análise de tamanho de partícula por difração de laser da cinza pesada moída.	56
Tabela 7: Densidade Aparente das composições de cinza	57

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BPR	Ball-to-powder weight ratio
LAFUN	Laboratório de Fundição
MAE	Moagem de Alta Energia
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
PCA	Agente controlador do processo
pH	Potencial hidrogeniônico
SOTELCA	Sociedade Termoelétrica de Capivari SA
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UTCA	Usina Termoelétrica de Capivari de Baixo
UTLA	Usina Termoelétrica Jorge Lacerda A
UTLB	Usina Termoelétrica Jorge Lacerda B

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Explicação	Unidade
μm	Micrômetro	10^{-6}m
d	Densidade	g/cm^3
h	Altura	mm
\varnothing	Diâmetro	mm
HV	Dureza Vickers	GPa
p	Pressão	MPa

RESUMO

Neste trabalho foram realizadas as moagens da cinza pesada de carvão mineral nos tempos de 2h, 4h, 8h, 16h, 32h e 64h para desenvolvimento do compósito Cinza-20Fe contendo 80% de cinza pesada moída e 20% de pó de ferro. As amostras foram compactadas com diferentes pressões, variando entre 300 a 400 N/mm² e posteriormente sinterizadas a 1500 °C, seguindo as etapas da metalurgia do pó convencional. A determinação do tamanho de partículas das amostras após a moagem foi realizada por difração a laser. A análise microscópica mostrou que com o aumento do tempo de moagem resultou em uma maior deformação e/ou fragmentação das partículas. A microestrutura dos corpos de prova e a homogeneidade da cinza nos diferentes tempos de moagem foram avaliadas utilizando-se Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Em seguida foi feita a compactação e obteve-se a curva de compressibilidade. Também determinou-se a densidade aparente e a densidade à verde. Realizou-se a sinterização e foi verificada a densidade das amostras sinterizadas. Mediu-se a microdureza, realizou-se o ensaio de MEV e EDS da amostra sinterizada. Os melhores resultados para o compósito Cinza-20Fe foram conseguidos para o tempo de 32 horas de moagem, onde foi obtida uma boa densificação. Tempos de moagem maiores que 32 horas foram prejudiciais nas propriedades do material. Os resultados mostraram que não é possível a obtenção de compósitos a partir da cinza pesada.

Palavras-chave: Cinza pesada de carvão mineral; Moagem; Metalurgia do pó; compósitos.

ABSTRACT

In this work the milling of coal bottom ash was performed in times of 2h, 4h, 8h, 16h, 32 h and 64 h for the development of ash - 20Fe composite containing 80% bottom ash and 20 % milled iron powder. Samples they were compressed with a pressures ranging from 300 to 400 N/mm² and then sintered at 1500°C, following the steps of conventional powder metallurgy. The determination of the particle size after grinding of the samples was performed by laser diffraction. Microscopic analysis showed that with increasing milling time resulted in a greater deformation and / or fragmentation of the particles. The microstructure of the specimens and the homogeneity of the ashes in different milling times were evaluated using Scanning electron microscope (SEM). Then the compression tests was permormed and the curve was obtained. We also determined the apparent density and the green density. Sintering was performed and the density of the sintered samples. Microhardness, SEM and EDS test analyses of the sintered samples were performed. The best results for the composite ash-20Fe was achieved for the time of 32 hours grinding, which achieved a good densification . Times greater than 32 hours of milling were detrimental to the properties of the material. The results showed that it is not possible to obtain composites from bottom ash.

Keywords: Coal Bottom Ash; Milling; Powder metallurgy; Composites.

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e a busca por alternativas para minimização de impactos ambientais faz com que se aumentem os estudos relacionados ao aproveitamento de materiais impulsionando o desenvolvimento de novas linhas de pesquisa ligadas à criação de materiais de diferentes propriedades e diversas aplicações. Como alternativa de reaproveitamento de materiais tem-se o uso da cinza pesada gerada em termoelétrica através da queima do carvão mineral para a produção de energia.

A cinza pesada é depositada em bacias de sedimentação ficando o resíduo sujeito a processos de lixiviação de metais pesados, podendo contaminar o lençol freático e o solo da região. Composta principalmente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), com porcentagens menores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), sulfatos (SO_4) e outras combinações. Por se tratar de um material com uma maior composição em materiais cerâmicos como a sílica e o óxido de alumínio, leva-se à possibilidade de seu estudo na fabricação de *cermets* por metalurgia do pó [1].

Os *cermets* são comumente lembrados como materiais de alta dureza e que possuem uma fase cerâmica e uma fase metálica.

A metalurgia do pó é o ramo da indústria metalúrgica que se dedica à produção de peças a partir de pós metálicos e não metálicos e tem como etapas a preparação dos pós a compactação e a sinterização [2].

A cinza pesada foi utilizada neste estudo devido ser em grande parte formada por alumina e sílica, materiais cerâmicos, e pelo fato da cinza ser produzida em grande quantidade e não ter um destino correto pensou-se em sua utilização na fabricação de *cermets*, incluindo o ferro como fase metálica.

A Figura 1 mostra as linhas de pesquisa em metalurgia do pó realizadas e em andamento no Ldtm da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, com destaque para este trabalho.

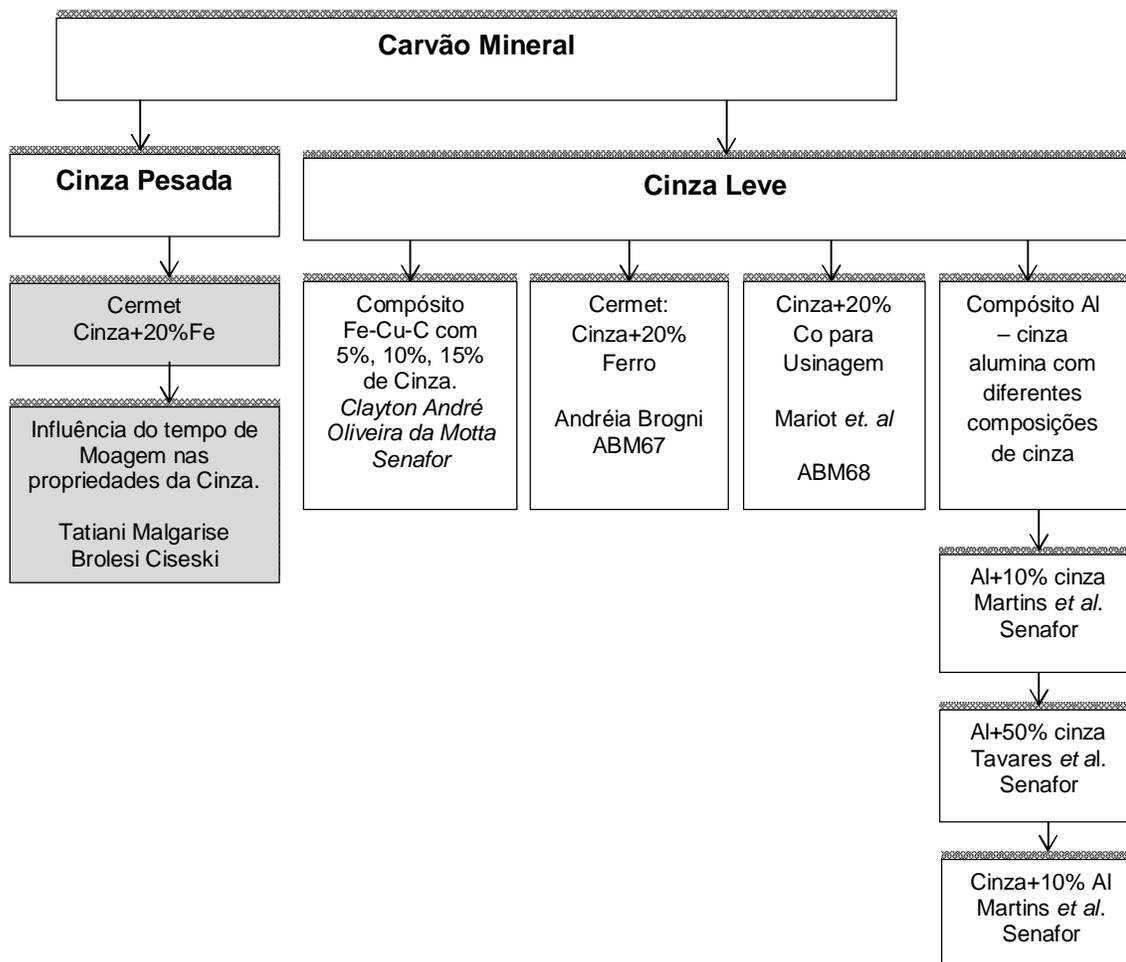


Figura 1: Linhas de pesquisa sobre cinzas realizadas e em andamento no Ldtm.

Fonte: <http://www.ufrgs.br/ldtm/>

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar a influência da moagem da cinza pesada obtida da queima em termoelétrica no composto cinza-20%Fe através da metalurgia do pó convencional.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudar o efeito da moagem da cinza em suas características;
- Compactar e sinterizar os pós de ferro com cinza pesada em diferentes tamanhos de partículas;
- Avaliar características físicas e mecânicas das amostras sinterizadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Produção de cinzas a partir do carvão mineral

O crescente desenvolvimento social e industrial da sociedade tem provocado o aumento do consumo de energia elétrica. Para suprir essa maior demanda novas fontes e, sobretudo novos projetos de usinas geradoras estão previstos e, dentre estes, têm-se as termelétricas a carvão, que produzem energia mediante a queima do carvão mineral nas caldeiras de combustão. A constante queima do carvão mineral deu lugar à geração duas granulometrias de resíduos prejudiciais ao meio ambiente: a cinza leve e a cinza pesada.

2.1.1 Criação da Usina Termoelétrica Jorge Lacerda

Com o intuito de melhor aproveitar o carvão nacional e suprir a falta constante de energia elétrica que havia no Brasil, por extensão em Santa Catarina, foi criada na cidade de Capivari de Baixo, em 1957, a Sociedade Termoelétrica de Capivari SA (Sotelca), empresa que seria responsável pela construção de uma termoelétrica. De 1961 a 1965, foi construída a Usina Termoelétrica Jorge Lacerda, inaugurada 7 em julho de 1965, com uma potência instalada de 50MW [3].

A Figura 2 mostra a vista geral da Usina termoelétrica Jorge Lacerda onde se encontram suas três usinas: Usina Termoelétrica Jorge Lacerda A (UTLA), Usina Termoelétrica Jorge Lacerda B (UTLB) e Usina Termoelétrica Jorge Lacerda C incluindo o Depósito de cinzas. [4].



Figura 2: Vista geral do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda [4].

2.1.2 Processo de formação das cinzas leve e pesada

O carvão mineral é uma matéria-prima sólida, constituída por duas frações intimamente misturadas, uma orgânica (matéria volátil e carbono fixo) e uma fração mineral (argilas, quartzo, piritas, carbonatos, etc.) [4].

As cinzas pesadas e leves são geradas a partir da combustão do carvão mineral em caldeiras. Pela ação do calor no interior das caldeiras, a fração orgânica do carvão mineral gera voláteis e char, enquanto a fração mineral se transforma em cinza com uma mineralogia modificada, tendo em vista, a perda de água das argilas, decomposição dos carbonatos, oxidação dos sulfetos, etc. [5].

As cinzas são formadas a partir de componentes não combustíveis do carvão e, também, de partículas não queimadas devido à combustão incompleta do carvão pulverizado na câmara de combustão, em temperatura variável entre 1200 e 1600 °C [6].

No interior das caldeiras, a existência de diferentes zonas de temperaturas faz com que as partículas do carvão pulverizado, ou seja, carvão em forma de pó com partículas inferior a 200 mesh apresentem, após a queima, características diferentes, resultando em frações de cinzas com características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais distintas, sendo possível classificar as cinzas em dois tipos distintos: leves (*fly ash*) e pesadas (*bottom ash*) que serão descritas posteriormente [7].

A Figura 3 ilustra o processo de geração de energia térmica por meio da queima do carvão mineral pulverizado a seco em uma termelétrica tipicamente encontrada no Brasil. Desse processo resultam as cinzas leves e pesadas.

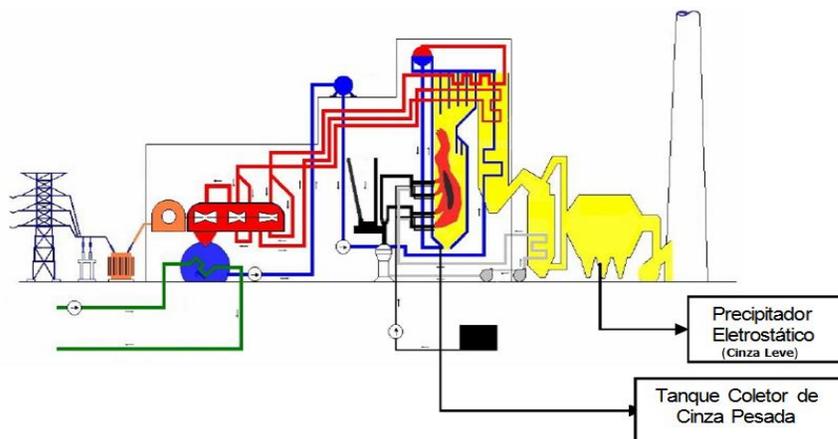


Figura 3: Esquema de geração de energia térmica e produção das cinzas [7].

Nas usinas termoeletricas, após a combustão do carvão em caldeiras mais de três quartos da cinza produzida é leve o bastante para ser arrastada com os gases de combustão (cinza leve ou volante), sendo na sua maior parte coletada por equipamentos de retenção, como precipitadores eletrostáticos [8].

As cinzas remanescentes são densas o suficiente para não serem emitidas para a atmosfera e caem, no fundo da caldeira, fundidas em partículas maiores (cinza pesada ou residuária) [9].

No Complexo Termoeletrico Jorge Lacerda a cada 100 toneladas de carvão mineral queimados, são produzidas, aproximadamente, 70% de cinzas leves, alocadas em silos e posteriormente vendidas para a indústria de cimento, e 30% de cinzas pesadas, destinadas às bacias de decantação [10].

Em média 1 kg de carvão produz cerca de 150 g de cinza, que por sua vez contém entre 6 e 24 g de carvão incombustível. Cerca de 20% dos resíduos precipitam-se no fundo da câmara de combustão (cinza pesada), enquanto que os 80% restantes são compostos de partículas finíssimas (cinza leve), que são recolhidas por meio de filtros especiais instalados ao longo do percurso de saída dos gases de combustão. [11].

No Brasil, a produção de cinza pesada, oriunda da queima do carvão mineral, está concentrada na região Sul, sobretudo nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Somente em Santa Catarina, a produção anual de cinzas leve e pesada alcança 818.000 t, sendo que 30% desse total, aproximadamente 245.400 t, é correspondente à cinza pesada [12].

As características físicas e químicas das cinzas de carvão variam de acordo com as características do mineral natural que as originou (carvão mineral), com o tipo de queima do carvão, projeto e operação da caldeira, grau de beneficiamento e moagem, sistema de extração e manuseio [13].

De modo geral, cinzas são minerais alumino-silicatos constituídos pelas fases amorfa e cristalina. A fase amorfa constituem-se de um pó de partículas finas com propriedades pozolânicas, composto principalmente por partículas vítreas e esféricas [14].

Segundo o processo de queima do carvão, as cinzas obtidas podem ser divididas em dois tipos, a saber [15]:

- Cinzas de fundo ou pesadas (*bottom ash*) - são cinzas mais pesadas de maior diâmetro, que caem para o fundo das fornalhas de queima de carvão

pulverizado ou de leito fluidizado, podendo ser retiradas secas ou através de um fluxo de água. Geralmente contêm teores de carbono/material orgânico não queimado de 1 a 5 %.

- Cinzas volantes ou leves (*fly ash*) - são as cinzas leves constituídas de partículas muito finas, todas abaixo de 0,15mm e com altos teores de frações menores que 0,05mm. Este é o resíduo da combustão do carvão que entra no fluxo do gás da chaminé, podendo ser coletado nos precipitadores eletrostáticos ou em filtros mecânicos, ou ainda, serem exaladas para a atmosfera exterior.

2.2 Cinza pesada

2.2.1 Características químicas da cinza pesada

Composta principalmente por sílica, alumina e óxido de ferro, com porcentagens menores de óxido de cálcio, óxido de magnésio, sulfatos e outras combinações.

Foram estudadas as características químicas dos carvões e das cinzas leve e pesada de todas as usinas termelétricas brasileiras (Figueira/PR, Jorge Lacerda/SC, Presidente Médici/RS, São Jerônimo/RS e Charqueadas/RS). As concentrações médias dos elementos traço dos carvões brasileiros foram similares ou menores do que a média para os carvões de outros países [16].

O pH (Potencial hidrogeniônico) das cinzas varia de 4,5 a 12 dependendo das características geoquímicas do carvão precursor [17].

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises químicas em porcentagem (%) das amostras de cinza pesada de diferentes tipos de carvão e diferentes regiões dos Estados Unidos da América [7].

Tabela 1: Composição química das cinzas pesadas americanas [7].

Localização	West Virginia		Ohio	Texas	
Tipo do Carvão	Betuminoso			Sub-betuminoso	Linhita
SiO ₂	53,6	45,9	47,1	45,4	70
Al ₂ O ₃	28,3	25,1	28,3	19,3	15,9
Fe ₂ O ₃	5,8	14,3	10,7	9,7	2,0
CaO	0,4	1,4	0,4	15,3	6,0
MgO	4,2	5,2	5,2	3,1	1,9
Na ₂ O	1,0	0,7	0,8	1,0	0,6
K ₂ O	0,3	0,2	0,2	-	0,1

As características físicas, químicas e mineralógicas das cinzas de carvão mineral, geradas nas usinas termelétricas, são compatíveis com várias matérias-primas utilizadas nas indústrias cerâmicas, o que indica uma possibilidade de substituição parcial ou integral destas matérias-primas por este resíduo, formado majoritariamente por quartzo (SiO₂) e mulita (3SiO₂.2Al₂O₃) [7].

A Tabela 2 apresenta a análise química da cinza pesada da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, incluindo a análise de perda ao fogo a qual se refere à medida da diferença entre o peso de uma amostra antes e depois de queimada a 1220 °C por duas horas, expressa em porcentagem (%). De acordo com as análises químicas da cinza pesada pode-se verificar que os componentes predominantes são óxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃), respectivamente nas seguintes proporções 54,04% e 25,19% [7].

Tabela 2: Análise química em óxidos da cinza pesada de carvão mineral do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda [17].

Constituintes	Cinza pesada (%)
SiO ₂	54,04
Al ₂ O ₃	25,19
Fe ₂ O ₃	4,61
CaO	2,26
MnO	0,03
MgO	1,41
TiO ₂	0,91
Na ₂ O	0,86
K ₂ O	0,95
P ₂ O ₅	0,22
Perda ao Fogo	8,52

Fazendo uma comparação nos dados da Tabela 1 e da Tabela 2 pode-se verificar que os constituintes majoritários da cinza pesada do carvão mineral tanto o Americano quanto o Brasileiro são SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , quase nas mesmas proporções, sendo que o SiO_2 representa cerca de 50% e o Al_2O_3 aproximadamente 30% do total da composição. Os percentuais de Fe_2O_3 e outras impurezas presentes na cinza pesada são baixos.

2.2.2 Característica física da cinza pesada

As cinzas pesada apresentam partículas com textura superficial muito porosa. A maior parte das partículas de cinza pesada apresentam tamanho característico de areia, normalmente com 50 a 90% passando na peneira 4,75mm (Nº 4), 10 a 60% passando na peneira de malha 0,42mm (Nº 40), 0 a 10% passando na peneira 0,075mm (Nº 200), podendo apresentar, ainda, diâmetros máximos na faixa entre 19mm e 38,1mm [7].

2.2.3 Formas de destinação da cinza pesada

No mundo todo, para o descarte das cinzas existem, basicamente, dois métodos para a deposição: as lagoas de sedimentação e os aterros. As lagoas são depósitos que recebem as cinzas misturadas com água, onde as partículas de cinza vão sedimentando-se, e a água efluente, após passar por várias lagoas ou tanques de sedimentação, é tanto descartada para córregos receptores como volta para as plantas de geração para serem reutilizadas. A cinza pode sair também seca nos locais de sua geração e servir de aterro. Em ambos os casos, o uso de revestimento está se tornando muito comum, devido às preocupações com a contaminação das águas subterrâneas e superficiais, aumentando, no entanto, os custos para estes depósitos [15].

Sabe-se que a forma de acumulação destas cinzas se dá por uma decisão puramente econômica, sem considerar as relações com o ambiente, sendo essas dispostas de forma indiscriminada dentro do perímetro urbano e nas zonas rurais. Uma parte das cinzas produzidas que não se comercializa é depositada nas cavas de mineração, servindo aos propósitos de aterro e de ajuste da topografia. Entretanto, os montes de cinza que se acumulam na mina sofrem a ação de

agentes climáticos, que causam a dispersão do material no ambiente [15].

A utilização da cinza de fundo de caldeira (pesada) em aterros, também constitui riscos ao meio ambiente. Isto se dá em razão da percolação¹ e lixiviação² das cinzas pelas águas pluviais, arrastando para o lençol freático, substâncias eventualmente tóxicas, que por esse meio podem atingir os mananciais de abastecimento de água, neste caso são inúmeras as recomendações para cuidados na utilização das mesmas em aterros [18].

As cinzas pesadas produzidas no Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda, por sua vez, são usadas na recuperação de solo ou de depósitos de rejeitos de carvão na região de Capivari de Baixo e Laguna, ou retornam para as minas de carvão. As cinzas que possuem pH alcalino, podem atuar como neutralizador da acidez do solo [18].

O principal esforço para a redução dos impactos ambientais decorrentes da disposição das cinzas de carvão no meio ambiente vem sendo direcionado no sentido de avaliar as potencialidades das cinzas, para utilização em diferentes processos industriais. Assim sendo, conhecer a concentração dos elementos presentes nestas cinzas é cada vez mais importante [19].

2.2.4 Usos da cinza pesada

A principal aplicação das cinzas de carvão é a comercialização para o setor de construção para aplicações em concreto, fabricação de cimento e argamassas, em processos de estabilização sob pressão, aterros estruturais, bases estabilizadas, solos modificados e estabilizados para rodovias, pistas e edificações.

Destacam-se também as indústrias voltadas à fabricação de artefatos para a construção civil, tais como blocos, tijolos, placas, lajotas, painéis, etc, mas isto ainda ocorre em apenas algumas centrais termelétricas do Brasil e somente com as cinzas leves, aproximadamente 34% das cinzas geradas. O excedente tem como destino final, além dos depósitos, as bacias de decantação (chamadas cinza de lagoa) e cavas de minas exauridas [20] [21].

¹ É o movimento e infiltração de líquidos por materiais porosos.

² Processo de extração de uma substância presente em componentes sólidos através da sua dissolução num líquido.

Nos Estados Unidos, a cinza pesada é empregada com sucesso na construção rodoviária desde a década de 1950, além de ser utilizada também na fabricação de blocos de concreto, drenos de rodovias e aterros [7].

2.3 Metalurgia do pó

A metalurgia do pó envolve uma sequência de processamento que permite fabricar diversos componentes a partir de pós metálicos e não metálicos. [22].

É o processo metalúrgico de fabricação de peças metálicas e não metálicas, que se distingue dos demais processos de fabricação de componentes por possuir as seguintes características [23]:

- Utilização de pós metálicos e não-metálicos como matérias-primas;
- Ausência de fase líquida ou presença parcial dessa durante o processo;
- Produção de peças com formas definitivas ou parcialmente, dentro de tolerâncias bastante estreitas, geralmente sem necessidade de operações de usinagem ou outro tipo de acabamento;
- Produção de componentes com características estruturais e físicas impossíveis de se obter por qualquer outro processo metalúrgico;
- Obtenção de peças em grandes séries, tornando o processo altamente competitivo em relação aos processos convencionais, sendo assim uma das menores perdas de processo.

Dois fatores econômicos contribuem para que a metalurgia do pó seja utilizada em grande escala, são eles o número reduzido de operações na produção da peça acabada, em relação a outros processos, e o aproveitamento quase que total da matéria-prima [24].

A metalurgia do pó convencional, é processada pela sequência de etapas que consistem na obtenção da matéria-prima, mistura e moagem, compactação, sinterização e acabamento [25].

A Figura 4 ilustra as etapas do processo de metalurgia do pó, desde o recebimento da matéria-prima, passando pelos processos de mistura, compactação, sinterização até o processo final que pode incluir processos complementares para depois seguir para a embalagem ou até mesmo o processo de calibragem se necessário [26]:

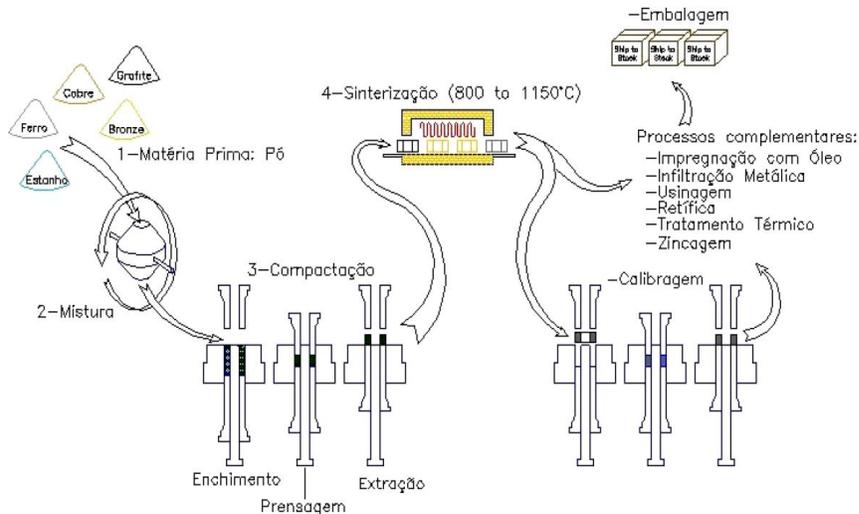


Figura 4: Etapas do processo da Metalurgia do pó [26].

Abaixo são descritas as etapas que fazem parte do processo de metalurgia do pó que estão numeradas na Figura 4:

1. Os pós que serão utilizados no processo da metalurgia do pó.
2. Os pós são misturados para dar homogeneidade à peça.
3. A mistura é colocada na matriz, prensada e depois extraída.
4. A peça é então sinterizada em fornos especiais.
5. Dependendo do caso, a peça passa por um processo complementar para melhorar tolerâncias (calibragem), propriedades (tratamento térmico), entre outros.

Tendo em vista o crescimento constante da metalurgia do pó, para a fabricação de diversas peças, houve uma maior motivação de toda a comunidade científica em aperfeiçoar as técnicas envolvidas no processo, bem como em buscar um melhor aproveitamento da matéria prima utilizada [27].

2.3.1 Mistura e homogeneização de pós

A mistura e homogeneização é uma etapa que depende muito do material com o qual se está trabalhando e o que se deseja produzir com ele. Esse processamento tem basicamente dois objetivos: dar ao pó a condições necessárias para posterior processamento, tal como a preparação do mesmo para a etapa de compactação [28].

A mistura é uma operação na qual se procura dispersar pós de diferentes espécies químicas, além de introduzir algum tipo de substância lubrificante ou formar vários tipos de ligas ou adicionar ao pó um agente ligante, ou ainda, efetuar todas estas operações simultaneamente [28].

A técnica e os parâmetros utilizados na mistura e na moagem dos pós determinam a dispersão, o tamanho e a distribuição das partículas do material utilizado [29].

A mistura uniforme proporciona uma microestrutura homogênea ao final do processo. E para melhorar esta homogeneização é adicionada à mistura glicerina que é um lubrificante, com a função de diminuir o atrito entre partículas da mistura e também das partículas com a parede do molde durante a compactação [24].

As misturas de variados pós para produzir a liga desejada e promover a homogeneização da matéria-prima são realizadas em misturadores em "V" ou "Y" próprios para a metalurgia do pó ou ainda moinho de esferas, também é adicionado lubrificante que tem a função de diminuir o atrito das partículas de pó entre si e o atrito destas com o ferramental de compactação [30].

2.3.2 Moagem

A Moagem é uma técnica de processamento de pós que permite a produção de materiais homogêneos partindo da mistura de pós-elementares. É uma síntese mecano-química onde as misturas de pós de diferentes metais ou ligas são moídas conjuntamente para obtenção de uma liga homogênea, através da transferência de massa [24 e 31].

O processo é baseado nas seguintes etapas que ocorrem no estado sólido, conforme Figura 5 [24]:

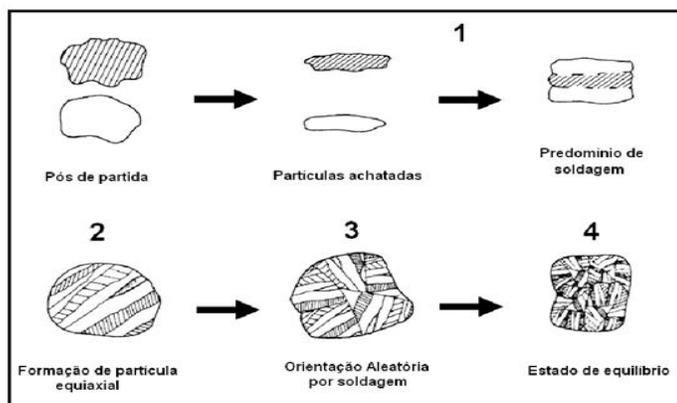


Figura 5: Evolução da microestrutura dos pós no processamento por moagem [24].

A Figura 5 mostra os estágios do processo de moagem os quais estão descritos a seguir:

Estágio 1: durante a colisão das esferas, as partículas que estão retidas entre as duas superfícies, ficam esmagadas, como se as duas superfícies fossem "microforjadas". Partículas achatadas com o formato de flocos podem ser então formadas [24].

Estágio 2: a partícula resultante, em formato de floco, possui uma maior superfície favorecendo a soldagem a frio das partículas e microestruturas lamelares são formadas. Um acréscimo do tamanho das partículas normalmente ocorre neste estágio "caldeamento" [24].

Estágio 3: com a continuação do processo de moagem, partículas criadas inicialmente passam a diminuir de tamanho, devido ao encruamento que o trabalho a frio causa. Assim os mecanismos de fratura passam a ser mais atuantes [24].

Estágio 4: os mecanismos de soldagem a frio e fratura encontram o equilíbrio, onde a dureza e o tamanho da partícula tendem a se estabilizar. Há a consolidação das partículas compósitas, atingindo um estado homogêneo em todas as partículas [24].

2.3.2.1 Variáveis do processo de moagem

A técnica de moagem envolve a otimização de um grande número de variáveis para atingir a fase, a dispersão e ou a microestrutura do produto final. As variáveis do processo são interdependentes, de forma que elas podem atuar simultaneamente e o efeito de cada uma delas durante o processamento é influenciado pelas outras [24].

2.3.2.1.1 Razão esfera / pó

A razão entre a massa das esferas para a dos pós (conhecida pela sigla BPR - *Ball-to-powder weight ratio*), está diretamente ligada com o tempo de moagem, quanto maior a BPR menor o tempo de moagem. Para uma carga de esferas muito baixa, a transferência de energia é pequena e conseqüentemente o tempo de moagem muito maior; se for alta, a razão de transferência de energia é alta e ocorre aquecimento excessivo, podendo ser alterada a constituição dos pós em razão da

alta temperatura [24].

Os valores em massa usados vão de 1:1 até 220:1. Recomenda-se uma razão esfera/pó baixa, por exemplo, 6:1 para moinhos de baixa capacidade, e uma alta razão, por exemplo, 50:1, para os de alta capacidade como um moinho do tipo atritor [24].

2.3.2.1.2 Material e tamanho das esferas

Os materiais mais usados para as esferas de moagem são aço inoxidável, aço ferramenta, alumina, zircônia ou metal duro. Entretanto, como no caso do recipiente de moagem, alguns materiais especiais são usados para os corpos de moagem, dependendo da composição dos pós da mistura de partida. Sempre que possível é desejável que o material do recipiente e dos corpos seja o mesmo dos pós, para evitar contaminações [24].

Para o uso em laboratório são utilizadas esferas de porcelana, pois exigem grandes esforços mecânicos e resistência a calor. São resistentes à corrosão e à abrasão, e tem baixa condutividade térmica o que lhe confere um custo x benefício e favorece a sua utilização em moinhos de bolas. Podem ser fabricadas com materiais cerâmicos, como zircônio, carbetto de silício, alumina e nitreto de silício [35].

O tamanho e a densidade das esferas também influenciam na eficiência da moagem, de modo que, quanto maiores forem esses valores, maior será a energia de impacto transferida às partículas de pó [24].

2.3.2.1.3 Tempo de moagem

O tempo de moagem é um dos parâmetros mais importantes do processo e normalmente é definido de modo a alcançar um estado estável entre a fratura e a soldagem a frio das partículas de pó. O tempo de moagem é função de uma combinação de parâmetros, os vários tempos requeridos dependem de [24]:

- Tipo de moinho utilizado;
- Intensidade de moagem;
- Relação bola/massa;

- Temperatura de moagem.

Para se decidir sobre o tempo de moagem é necessário avaliar todos estes parâmetros e os compostos que serão combinados. Além disso, deseja-se sempre que a moagem dure apenas o tempo necessário para a formação da fase desejada [32].

2.3.2.2 Tipos de moinho

Na moagem de materiais resistentes e/ou abrasivos ocorre a contaminação do produto pela abrasão da carcaça ou dos corpos moedores. A fim de minimizar essa contaminação, são utilizados moinhos revestidos de materiais resistentes à abrasão. O tipo de revestimento que pode ser usado depende do custo e da sensibilidade do material a ser cominuído, tais como óxido de alumínio, carbetto de silício e dióxido de zircônio [33].

Em alguns moinhos, a câmara de fragmentação é revestida com uma camada do próprio material, enquanto que em outros, os corpos moedores consistem do próprio material (*pebbles*). Em moagens onde há demanda de pureza elevada, os moinhos são revestidos com aços especiais e os contaminantes são removidos da polpa por lavagem ácida, numa etapa posterior do processo de moagem [33].

Existem diferentes tipos de equipamentos de moagem que podem ser usados no processamento da MAE. Dentre os tipos de moinhos pode-se citar o moinho Atritor, Planetário e Vibratório (SPEX). [24]. Cada um tem capacidade de moagem distinta, como listado na Tabela 3.

Tabela 3: Comparação entre os tipos de moinho [24].

Moinho	Capacidade	Energia do impacto (W/g)	Velocidade das esferas (m/s)	Uso
Planetário	< 1000 g	0 - 1,604	<11,24	Laboratório
Atritor	0,5 - 100 kg	<0,001	<0,8	Laboratório/ Industrial
Vibratório (SPEX)	<40 g	<0,24	<3,9	Laboratório

A Tabela 3 mostra a comparação entre os diferentes tipos de moinhos. Em relação à capacidade, o moinho atritor é o que possui a maior sendo usado até

mesmo em escala industrial. Quando se trata de energia de impacto e velocidade das esferas o moinho planetário é o que atinge os maiores valores [24].

2.3.2.2.1 Moinho de bolas planetário

O moinho de bolas é um equipamento de cilindro horizontal, preenchido parcialmente com esferas e movido por um motor a uma velocidade baixa. Ao girar, este cilindro provoca o cascadeamento das esferas que atritam com as matérias depositadas internamente. As ações de choque e cisalhamento provocam a redução do material a uma granulometria mais fina. Esses equipamentos são indicados para os materiais de difícil fragmentação [23].

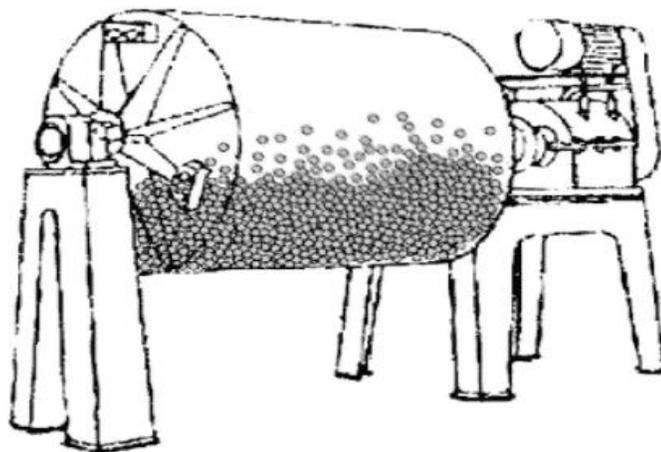


Figura 6: Modelo de moinho de bolas [23].

Além do uso para a fabricação de materiais a serem comercializados em grandes volumes, o moinho de bolas pode ser usado em laboratórios. Neste meio, geralmente é utilizado um material chamado alumina (óxido de alumínio), tanto para o cilindro quanto para as esferas, em função de sua grande densidade e para se evitar a contaminação dos materiais que estão sendo trabalhados [34].

2.3.3 Tipo de ligante – Ferro (Fe)

A utilização de ligas de pós de ferro é crescente na fabricação de produtos sinterizados que são empregadas com diferentes composições e diversas sequências de processamento. A variação da sequência de processamento e da

metodologia de adição de elementos de liga resultam em compressibilidades locais diferenciadas e microestruturas distintas [22].

Pós metálicos podem ser obtidos por técnicas químicas, na qual destaca-se a reação de decomposição de um sólido por um meio gasoso. A redução de óxidos (decomposição de sólido por gás) por atmosfera redutora é o método mais comum de obtenção de pós, quando são empregadas as técnicas químicas. Nesta técnica, um concentrado de óxido de ferro (hematita ou/e magnetita), previamente, moído para diminuição do tamanho de partícula é reduzido pela presença de um redutor gasoso ou sólido. O comportamento durante o processo e o tamanho de partícula obtido dependem da temperatura de redução. Normalmente, ocorre uma elevada variação de volume, em temperaturas de redução baixas, as partículas obtidas apresentam característica de esponja, em temperaturas mais elevadas o processo de sinterização ocorre com maior frequência, gerando partículas maiores. O pó de ferro é o material de maior produção, em escala comercial [22].

Alguns autores consideram a mistura entre pós um caminho mais fácil e flexível para obterem-se materiais para Metalurgia do pó. A técnica de mistura de pós ocorre com menor tempo e custo, em relação aos processos de obtenção dos pós pré-ligados e pré-difundidos [22].

Outro aspecto positivo está relacionado à compactação, pois a mistura não apresenta redução significativa da densidade a verde, em consequência da utilização de uma fração de pós com elevada compressibilidade. A porosidade não aumenta significativamente, portanto, a queda das propriedades mecânicas não é elevada. Os sinterizados de misturas de pós de ferro foram estudados para aplicações onde a resistência ao desgaste é um requisito de elevada importância [22].

A aplicação crescente de pó de ferro e ou misturas de pós como matéria-prima na indústria automobilística é motivada por diversas características benéficas. É consenso entre os fabricantes que as principais características destas misturas devem ter: adequada escoabilidade, alta compressibilidade, pequena recuperação elástica após a extração da matriz ("springback"), boa resistência a verde, baixa variação dimensional após a sinterização e elevadas propriedades mecânicas, estáticas e dinâmicas, após a sinterização e tratamento térmico [22].

A escoabilidade é uma importante característica, pois, junto com a densidade aparente, está diretamente relacionada ao adequado preenchimento da

cavidade da matriz, pelo pó ou pela mistura. A compressibilidade afeta a densidade obtida após a compactação, que por sua vez altera as propriedades finais dos componentes após a sinterização e tratamento térmico. A recuperação elástica após a extração, além de influenciar a dimensão do componente está relacionada também, ao projeto da ferramenta de compactação. A resistência a verde elevada é necessária para prevenir o aparecimento de trincas, durante a extração da matriz para permitir o manuseio do compactado. Variação dimensional pequena do sinterizado é um requisito para garantir as rígidas tolerâncias dimensionais, de componentes, em especial, as autopeças. [22].

2.3.4 Compactação

Na compactação, o pó ou a mistura de pós é colocado, em uma quantidade predeterminada, na cavidade de uma matriz que possui a geometria final desejada. Um dos principais requisitos da mistura é a boa escoabilidade que deve ser suficientemente elevada para garantir o preenchimento uniforme da matriz que é colocada em uma prensa de compressão, podendo ser mecânica ou hidráulica, e a compactação ocorre pelo deslocamento oposto dos punções [25].

O comportamento dos pós, quando submetidos à compressão é mostrado na Figura 7. No estágio inicial com a introdução de força mecânica, ocorre um rearranjo das partículas soltas para um denso empacotamento. Subsequentemente, os pontos de contatos se deformam com o aumento da força mecânica. Finalmente, as partículas sofrem ampla deformação plástica [24].

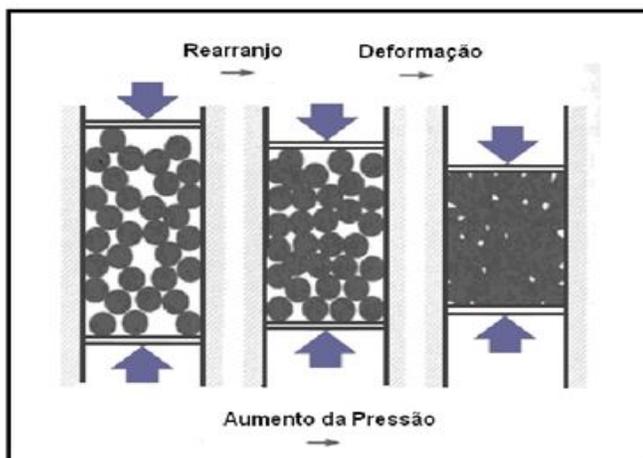


Figura 7: Estágios da movimentação das partículas na cavidade de uma matriz durante o processo de compactação [24].

A compactação de peças é responsável pela definição da geometria e densificação da mistura de pós. A principal propriedade que afeta a compactação é a compressibilidade do pó, que pode ser definida como a extensão segundo a qual uma massa de pó pode ser densificada pela aplicação de pressão. A compressibilidade é uma característica importante, pois determina a pressão a ser exercida pelo ferramental para se conseguir uma determinada densidade da peça [36].

2.3.5 Sinterização

A sinterização é um processo de difusão no estado sólido, onde os movimentos atômicos e conseqüentemente a difusão ocorrem mais rapidamente com o aumento da temperatura [23].

Feita, normalmente, em fornos contínuos, caracterizados por três zonas de operação: pré-aquecimento, manutenção da temperatura e resfriamento, conforme a Figura 8.

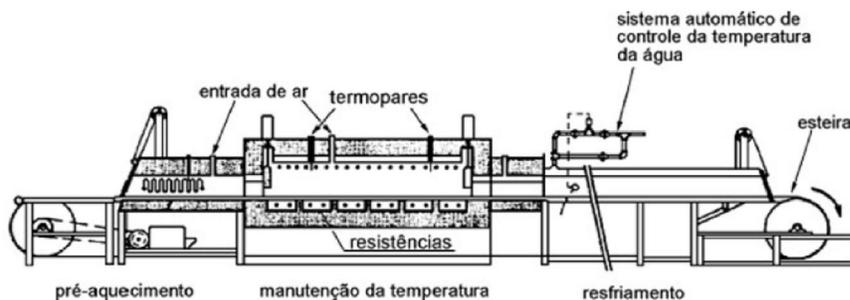


Figura 8: Etapas de funcionamento de um forno contínuo [26].

No processo de sinterização acontecem vários fenômenos os quais podem ser observados em análises de micrografia

Os fenômenos que ocorrem na sinterização podem ser percebidos na Figura 9: ligação inicial entre partículas; crescimento da ligação; fechamento dos canais que interligam os poros; arredondamento dos poros; densificação ou contração dos poros; crescimento eventual dos poros.

A Figura 9 mostra a micrografia do compactado verde e do compactado sinterizado onde é possível verificar os fenômenos que ocorrem na sinterização.

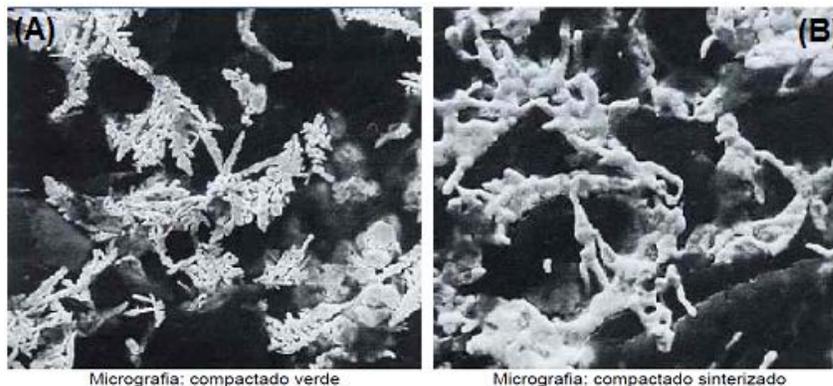


Figura 9: (A) Micrografia do compactado verde e (B) Micrografia do compactado sinterizado [17].

2.3.5.1 Sinterização por fase líquida

A sinterização por fase líquida acontece devido à formação de líquido na estrutura. Este líquido pode ser causado pela fusão de um dos componentes do sistema ou pode ser o resultado de uma reação entre, pelo menos, dois dos componentes do sistema [18].

No processo de sinterização por fase líquida o pó inicial é composto de dois ou mais componentes, onde um dos quais tem baixo ponto de fusão em relação ao componente principal da mistura [37].

Durante o processo de sinterização por fase líquida a tendência do líquido é cobrir as partículas sólidas, eliminando desta maneira a interface sólido - vapor.

A Figura 10 ilustra esquematicamente as etapas da sinterização assistida por fase líquida.

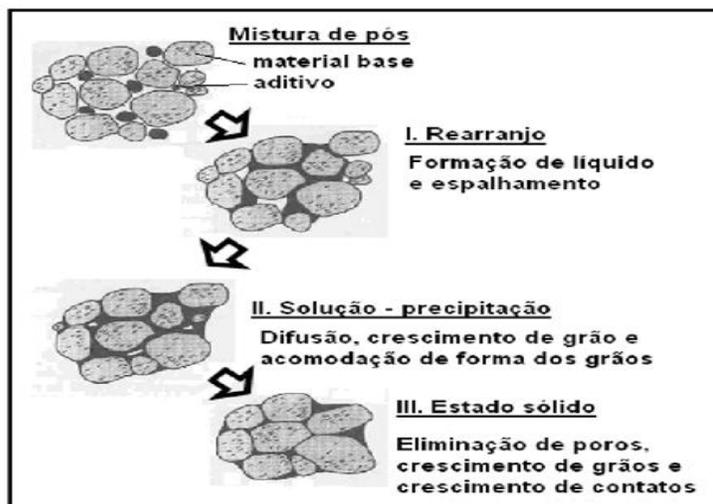


Figura 10: Estágios da sinterização por fase líquida [24].

O primeiro estágio como mostra a Figura 10 é o rearranjo das partículas e o compacto comporta-se como um sólido viscoso devido à ação capilar e a fração de densificação depende da quantidade de líquido, tamanho de partícula e solubilidade do sólido no líquido [25].

O segundo estágio da sinterização via fase líquida é o de solução-precipitação, que é caracterizado pela dissolução de partículas sólidas pequenas no líquido, precipitando nas superfícies sólidas de partículas grandes [25].

O último estágio característico de sinterização via fase líquida é marcado pela diminuição da taxa de densificação ou completa cessação da mesma, causada pelas maiores distâncias de difusão. Normalmente é o estágio mais demorado e é acompanhado por mudanças na forma das partículas, que favorece a uma melhor densificação [24].

2.4 Cermet

2.4.1 Definição

Cermet, ou "cerâmica + metal", é um material estrutural composto de uma fase cerâmica dura e uma ligação de metal fase, em que partículas finas de cerâmicas, que constituem cerca de 15-85%, em volume, são incorporados em uma matriz de metal ou liga metálica ligante [38].

Os *cermets* são materiais compósitos cerâmica-metal nos quais um determinado material, de elevada dureza, é envolvido em uma matriz de um metal que exerce a função aglutinadora das partículas. Podem ser definidos como compostos de fase cerâmica e fase metálica numa microestrutura heterogênea. A fase cerâmica, selecionada a partir de materiais com elevada dureza a quente e resistência à oxidação, é sinterizada em metal ou liga metálica a determinada temperatura, o que lhe confere ductilidade e tenacidade. Os componentes metálicos do compósito conferem tenacidade ao material e agem isolando as partículas de carbeto umas das outras, prevenindo a propagação de trincas de partícula para partícula, uma vez que estas, embora proporcionem uma superfície de corte de elevada dureza, são extremamente frágeis e não suportam, por si só, as tensões de corte. [39].

O *Cermet* é um produto da metalurgia do pó em que as partículas duras são baseadas mais em titânio (Ti) do que em tungstênio (W). Podem ser considerados como metais duros, porém com constituintes diferentes. São feitos de forma similar, através de misturas de pós prensados e compactados, que são então sinterizados [40].

2.5.2 História dos Cermets

Houve uma necessidade de desenvolver materiais com uma excelente força e resistentes a alta temperatura, com isso, durante a Segunda Guerra Mundial os cientistas alemães desenvolveram *cermets*. Primeiramente começaram usando nos motores de jato e lâminas de turbina [41].

Esse nome foi dado pela Força Aérea dos Estados Unidos, e é a combinação de dois materiais, um metal e um cerâmico. O primeiro material feito de *Cermet* foi usado óxido do magnésio (MgO), óxido do berílio (BeO) e óxido de alumínio (Al₂O₃) [42].

Comercialmente, existem diferentes ligas de cermet: carbeto de titânio à base de cimentos e carbonitreto de titânio à base de cermets. Pode-se citar também o metal duro que também é um *cermet*. TiC baseados em cermets estavam no mercado em meados dos anos 1960. Embora o cermet de (C, N) foi primeiro inventado em 1931, a maior parte da pesquisa e produção realmente começou após a investigação sistemática conduzida por Kieffer e colegas de trabalho em torno 1968 - 1970, que corrigiu o preconceito contra inclusões de nitrogênio. Desde então muitas classes têm sido desenvolvidas [40].

No passado os cermets tinham a fama de quebrar-se repentinamente durante a usinagem, mas a tenacidade melhorada tem minimizado esse risco e proporcionado melhor segurança. Antes, as alternativas de alguns fornecedores para contornar esse fenômeno eram uma classe muito resistente ao desgaste - porém frágil - e uma classe muito tenaz, mas com uma baixa capacidade de desempenho. Hoje encontram-se no mercado classes que combinam resistência ao desgaste e tenacidade [39].

2.5.3 Características dos Cermets

A grande maioria dos *cermets* possui bons níveis de tenacidade e resistência a impactos; elevada resistência ao desgaste nas arestas de corte e na craterização³, por possuir alta dureza a elevadas temperaturas e grande estabilidade química, com pouca tendência à difusão. É possível encontrar também outros elementos, presentes na sua composição, como: o alumínio (Al) e o molibdênio (Mo) e ainda alguns compostos como: carbeto de tântalo (TaC), carbeto de nióbio (NbC), carbeto de vanádio (VC), nitreto de alumínio (AlN), nitreto de tântalo (TaN), entre outros [38].

Os *cermets* têm sido amplamente utilizados devido à sua alta dureza e excelente resistência ao desgaste e à corrosão [43].

Como os *cermets* têm baixa condutividade térmica e grande coeficiente de expansão volumétrica, elevadas temperaturas são geradas no contato entre a ferramenta e o cavaco, com grande expansão de material nesta região, o que prejudica o desempenho do processo de usinagem [38].

A natureza da interface metal/cerâmica influencia fortemente o uso efetivo da resistência inerente do metal fase de reforço. A força interfacial da ligação entre matriz cerâmica e inclusões de metal tem de ser maior do que a resistência ao escoamento, caso contrário, a fenda contorna as partículas. Para evitar rachaduras interfaciais induzidas por tensões devidas à incompatibilidade térmica entre os dois elementos, as inclusões de metal devem ser mantidas sob uma dimensão crítica [44].

Os *cermets* caracterizam-se pelas seguintes vantagens [44]:

- Melhor capacidade e longa durabilidade para usinagem dentro de tolerâncias apertadas.
- Produzem melhores acabamentos superficiais.
- Melhor resistência ao desgaste de flanco.
- Melhor resistência ao desgaste de entalhe.
- Melhor resistência à deformação plástica (velocidade mais alta).

³ Formação de crateras, ou seja, cavidades, buracos nas ferramentas de usinagem.

No desempenho, ferramentas de corte *cermet* produzem um melhor controle e precisão, geometria das peças de trabalho e controle de tolerância, vida útil mais longa, acabamento de superfície melhorado e boa taxa de alimentação [40].

Embora o *cermet* possa parecer mais complexo que o metal duro convencional, como material de ferramenta ele possui certas propriedades que são muito vantajosas para algumas operações de acabamento [45].

Em temperaturas elevadas, *cermets* são resistentes à oxidação e possuem melhores propriedades de corte, muito boa aderência e resistência ao desgaste de difusão em comparação com o carbeto cementado. Portanto, eles podem trabalhar sem lubrificantes. Os *cermets* garantem melhor qualidade de superfície após usinagem [43].

Estes fatores fazem com que os *cermets* tenham um baixo coeficiente de resistência aos choques térmicos, ao se comparar com o mesmo coeficiente do metal duro, como apresentado na Tabela 4. Este coeficiente pode ser expresso como sendo a condutividade térmica multiplicada pela resistência à tração e dividida pelo coeficiente de dilatação e pelo módulo de elasticidade do material estudado [38].

Tabela 4: Comparação de propriedades físicas do cermet (TiC) com o metal duro (WC) [38].

Propriedades Físicas	Cermet (TiC)	Metal Duro
Dureza (HV)	3200	2100
Energia Livre de Formação (kcal/g – atm 1000 °C)	- 35	-10
Solubilidade no Ferro (wt% a 1250 °C)	0,5	7
Temperatura de Oxidação (°C)	1100	700
Condutividade Térmica (cal/cm.s.°C)	0,052	0,42
Coeficiente de Dilatação Térmica (10^{-6} / °C)	7,2	5,2
Coeficiente de Choque Térmico	1,9	27,1

A alternância de temperaturas altas e baixas também são fatores para criar falhas por trincas nas ferramentas, devido à variação volumétrica cíclica. Assim, dá-se preferência aos *cermets* para usinagem de acabamento e superacabamento de ferrosos, em especial os ferros fundidos e os aços endurecidos, devido às pequenas áreas de contato entre o cavaco e a ferramenta, podendo trabalhar com

altas velocidades de corte, mas, necessariamente, devem ser utilizados com pequenos avanços e pequenas profundidades de usinagem [38].

As propriedades mecânicas dos *cermets* são influenciadas por vários fatores, sendo os principais, as características físico-químicas dos pós do metal e do material cerâmico utilizados na sua fabricação. Assim, considera-se que essas características, juntamente com as variáveis de processamento, contribuem para determinar a resistência da matriz e a porosidade dos *cermets*. Por essa razão, grande parte dos estudos experimentais relativos ao comportamento mecânico dos *cermets* concentra-se na determinação de relações que expressem a dependência da resistência mecânica do *cermet*, a resistência mecânica da matriz e a concentração da fase cerâmica e/ou porosidade [46].

2.5.4 Aplicações dos Cermets

Os *cermets* estão competindo agora, em preços e propriedades, com metais pesados convencionais, mesmo com revestimento de metais duros, especialmente em altas velocidades de corte e no acabamento e fresagem [40].

Ferramentas de corte, matrizes, brocas, resistentes ao desgaste, bicos e revestimentos são exemplos de suas várias aplicações [43].

Em particular, os *cermets* consistindo de partículas de Al_2O_3 como inclusões a partir de ligas refratárias podem ser utilizado como um inserto em tubeiras de foguetes, como núcleos para a regulação do fluxo de metal fundido, como estabilizadores de chama na câmara de combustão de motores a jato e como um material para a fabricação de rolamentos [44].

Os *cermets* são usados na manufatura de resistores, capacitores e outros componentes eletrônicos que têm de ser expostos a altas temperaturas [47].

O carbetto metálico, também chamado de metal duro, tem importância fundamental no campo das ferramentas de corte, peças de desgaste e brocas para perfuração de rochas. Nessas ferramentas, o metal duro é adaptado nas partes cortantes, na forma de pastilha. Essas pastilhas possuem elevada dureza (quase igual à do diamante) e suportam temperaturas de até 1.000 °C sem sofrer perda de corte [26].

O metal duro pode ser produzido a partir do pó de tungstênio (W) puro, misturado ao pó de carbono (C) em proporções cuidadosamente controladas para

garantir a correta composição. Esta mistura é levada a uma temperatura de cerca de 1.700 °C, que provoca a união do tungstênio e do carbono, dando origem às partículas duras do metal duro, representadas pelos carbeto de tungstênio (WC). O carbeto de tungstênio dissolve-se facilmente em cobalto (Co), o qual é adicionado à mistura, atuando como metal ligante. O resultado final combina as propriedades da partícula dura (resistência ao desgaste) com as propriedades do metal ligante (tenacidade - absorção de impacto) [26].

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Considerações Gerais

O procedimento experimental relativo à fabricação do compósito em estudo, Cinza-20%Fe, tem como base as técnicas convencionais da metalurgia do pó associada à técnica de moagem de alta energia. Como decisão para a escolha do compósito utilizado levou-se em consideração o fato da cinza pesada ser um material abundante e sem destino correto associado ao ferro pelo seu baixo custo.

O Fluxograma da Figura 11 apresenta um resumo do procedimento experimental adotado para o desenvolvimento deste trabalho.

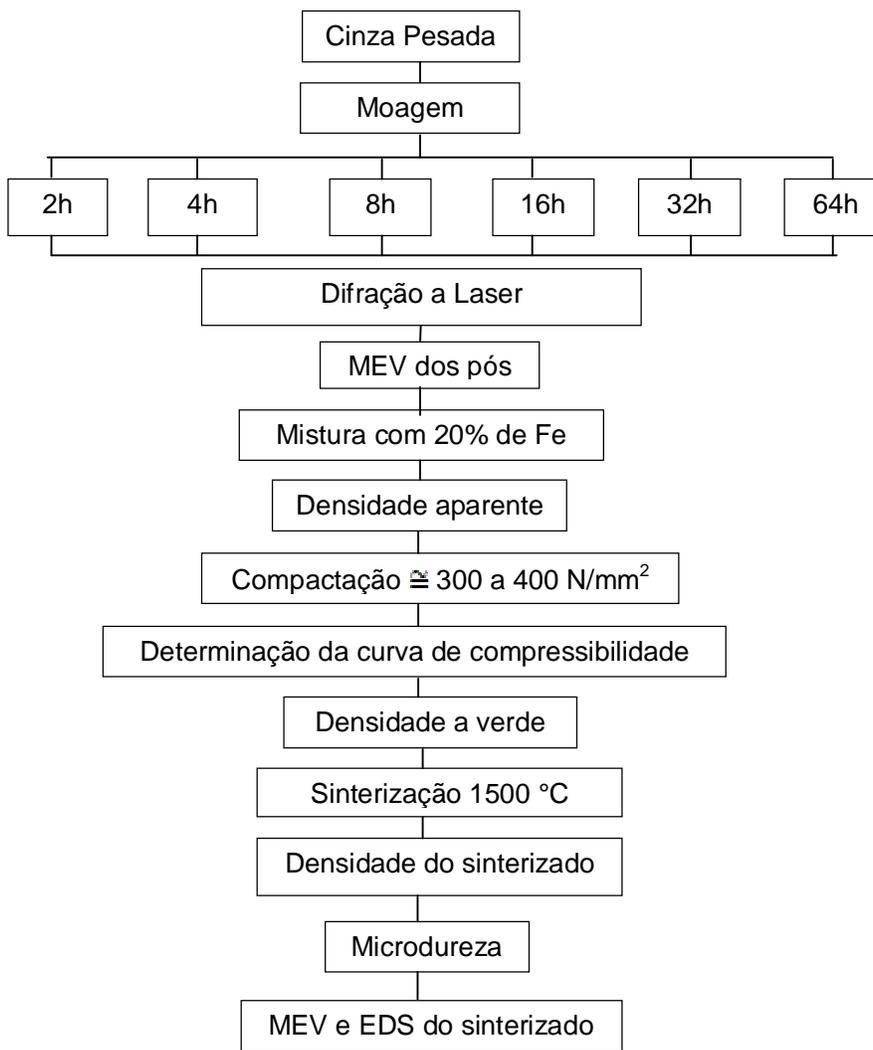


Figura 11: Fluxograma do trabalho desenvolvido.

3.2 Matérias-primas

3.2.1 Cinza Pesada

A cinza pesada utilizada na fabricação do compósito foi coletada na Usina Termelétrica Jorge Lacerda, no dia 17 de Novembro de 2011.

3.2.2 Ferro

Utilizou-se o pó de Ferro da empresa Hoganas. As características do pó de Ferro listadas na Tabela 5 foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 5: Características do pó de Ferro.

Pó	Grau de Pureza	Tamanho de Partícula	Fabricante
Fe	99%	- 325 Mesh	HOGANAS DO BRASIL

3.3 Moagem da cinza pesada

A moagem da cinza pesada foi realizada em moinho de bolas. Para a realização da moagem foram pesados 2 kg de cinza em balança analítica, colocada no recipiente de moagem e completada até 80% do seu volume com álcool etílico. Este último desempenha papel de agente controlador do processo (PCA). O recipiente de moagem e as esferas de moagem utilizadas são de cerâmica, a relação de massa das esferas por massa de pó foi de 5:1, ou seja, a cada 2 kg de esferas foram colocados 400 g de cinzas.

Os tempos de moagem foram de 2, 4, 8, 16, 32 e 64 horas, sendo retiradas amostras dos pós obtidos a cada tempo para caracterização.

Pós processados em cada moagem foram retirados do recipiente de moagem ainda misturados com álcool etílico e colocados em bandejas. Essas levadas a uma estufa a 60°C para secagem do álcool etílico, por aproximadamente 1 hora. Posteriormente foram retiradas amostras para análises das modificações ocorridas durante a moagem de alta energia.

3.4 Determinação de tamanho de partícula por Difração a Laser da cinza pesada

A técnica de avaliação do tamanho de partículas por difração de laser é um método pelo qual as partículas são dispersas num fluido (neste caso água) em movimento causando discontinuidades no fluxo do fluido, que são detectadas por uma luz incidente, e correlacionadas com o tamanho de partícula.

O princípio do método é que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. Ao atingir uma quantidade de partículas, a luz incidente sofre uma interação segundo quatro diferentes fenômenos (difração, refração, reflexão e absorção) formando um invólucro tridimensional de luz. O formato e o tamanho deste invólucro são afetados pelo índice de refração relativo da partícula no meio dispersante, pelo comprimento de onda da luz, e pelo tamanho e formato da partícula. Detectores estrategicamente posicionados medem a intensidade e o ângulo da luz espalhada. O sinal dos detectores é então convertido para a distribuição de tamanho de partícula através de programas e equações matemáticas.

3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da cinza pesada

Para determinação do tamanho de partícula as amostras de cinza pesada foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) do centro de microscopia da UFRGS, de marca JEOL modelo 5800 com EDS acoplado como mostra a Figura 12.



Figura 12: Microscópio eletrônico de varredura (MEV).

3.6 Mistura e Compactação dos pós em matriz cilíndrica

3.6.1 Mistura dos pós

Utilizou-se de uma balança analítica da marca Marte para determinar o peso exato de pó e a partir do cálculo de balanço de massa determinou-se a quantidade de cinza e pó de ferro para o compósito cinza-20Fe. Para minimizar o atrito entre as partículas do pó e a parede da matriz acrescentou-se 4% de parafina para os diferentes tempos de moagem. As misturas foram realizadas para as cinzas com diferentes tempos de moagem.

3.6.2 Compactação dos pós em matriz cilíndrica

Para a compactação foi utilizada uma matriz cilíndrica de aço temperado na prensa hidráulica da marca Bovenau com capacidade máxima de 30 toneladas. O ferramental de compactação é a matriz de 13,0 mm de diâmetro interno (\emptyset) e 50,0 mm de altura (h) juntamente com o punção superior de 15mm de altura e o punção inferior de 60mm de altura. A Figura 13 mostra o ferramental onde foram realizadas as compactações.



Figura 13: Matriz cilíndrica de compactação.

3.6.1 Curva de compressibilidade do compósito Cinza-20Fe

Definiu-se a pressão de compactação através da curva de

compressibilidade, traçada com base na norma ASTM B331. Essa norma define que a compressibilidade e a capacidade de certa quantidade de pó densificar sob a ação de uma pressão de compactação. Para definir a curva aplicam-se várias pressões de compactação, nas quais resultaram diferentes densidades.

3.7 Densidade Aparente do compósito Cinza-20Fe

Define-se a densidade aparente de um pó como a massa (g) de uma unidade de volume de pó solto ou a relação da massa para o volume, em g/cm^3 . A importância do conhecimento dessa característica reside no fato de que ela determina o verdadeiro volume ocupado por uma massa solta de pó e em consequência, determina a profundidade da cavidade da matriz e o comprimento do curso da prensa necessário para compactar e densificar o pó. Os valores de densidade aparente foram obtidos utilizando a matriz disponível com cavidade de 50,0 mm de altura (h), com diâmetro de 13,0 mm, preenchendo-a completamente com a mistura de pó solto, tendo um volume fixo de $7,69 \text{ cm}^3$, em um formato cilíndrico, adaptado da ASTM B 212.

3.8 Densidade a verde do compósito Cinza-20Fe

Foram medidas as massas dos corpos de provas compactados em uma balança analítica e mensurados através de um micrômetro, os diâmetros e alturas para calcular-se o volume. Utilizando a equação da densidade que relaciona o volume e a massa foi obtida a densidade a verde do compactado.

3.9 Sinterização do compósito Cinza-20Fe

A sinterização do material estudado exige forno de alta temperatura e atmosfera controlada. Neste trabalho foram realizadas inúmeras sinterizações para determinar condições de temperatura e tipo de gases para atmosfera de sinterização, pois todos estes parâmetros influenciam diretamente nas propriedades dos sinterizados.

3.9.1 Condições de sinterização

Na sinterização do compósito foi necessário forno com variações de temperaturas e atmosfera contendo 25 % de hidrogênio e 75 % de nitrogênio (gás marrom). A temperatura utilizada foi de 1500 °C. A sinterização se deu em forno tubular elétrico de resistência de carvão de silício, com controle eletrônico, precisão de ± 1 °C, na temperatura de trabalho.

A sinterização das amostras se fez a um patamar de temperatura de 1500 °C e taxa média de aquecimento de 10 °C/min. As amostras foram resfriadas ao forno. O patamar de 1500 °C foi usado, pois a fusão do ferro acontece em média a 1536 °C e a temperatura de início da sinterização são definidas utilizando-se de 2/3 a 3/4 da temperatura de fusão de um material.

A Figura 14 mostra o forno utilizado na sinterização do compósito.



Figura 14: Forno utilizado na sinterização

3.10 Caracterizações das amostras sinterizadas

Foram realizados vários ensaios para determinar as características das amostras sinterizadas. Para a determinação das características físicas foram realizados os ensaios: densidade do sinterizado, contração linear e volumétrica. Para determinação das características mecânicas: microdureza.

3.10.1 Densidade do Sinterizado

A densidade também chamada de massa específica aparente foi determinada através do método de Arquimedes, conforme norma MPIF-95, que se baseia no empuxo exercido sobre a amostra durante sua imersão em um recipiente com água acoplado a uma balança. A massa seca é medida antes de qualquer outra etapa, e essa foi mensurada em uma balança analítica, a massa saturada é obtida após fervura das amostras em água durante 20 minutos, e para isso as amostras devem ser isentas de qualquer gotícula. A massa imersa é a massa medida após a amostra estar saturada, descontando-se o empuxo. Através da determinação do volume da peça sinterizada determinou-se a densidade do sinterizado.

3.10.2 Microdureza

A medida de microdureza Vickers, segundo a norma ASTM E 384 - *Standard Test Method for Microhardness of Materials*, define o ensaio de microdureza, como a dureza de microindentações realizadas em equipamento calibrado com penetradores de diamantes de geometrias específicas. Foi realizado o ensaio no microdurômetro Shimadzu n. 4725 do LAFUN - Laboratório de Fundação da UFRGS. Utilizaram-se cargas de 1000 gf, sobre a superfície de ensaio do material para se medir opticamente as diagonais das indentações.

3.10.3 Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)

Utilizada na identificação da composição elementar de uma amostra ou pequena área de interesse na respectiva amostra.

As análises de EDS foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol 5800, num sistema de microssonda da marca Noran Instruments acoplado ao MEV do Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Determinação do efeito da moagem das cinzas

Através da micrografia juntamente com a análise de tamanho por difração a laser realizada é possível avaliar a evolução da morfologia das partículas ao longo das 64 horas de moagem. Durante o processo de moagem, os pós são submetidos à colisão de alta energia, o que provoca a deformação plástica e fratura dos pós. Na primeira etapa da moagem, as partículas dúcteis sofrem deformação enquanto que as partículas frágeis sofrem fragmentação. A Figura 15 apresenta a cinza com 2 horas de moagem com partículas próximas a 80 a 200 μm .

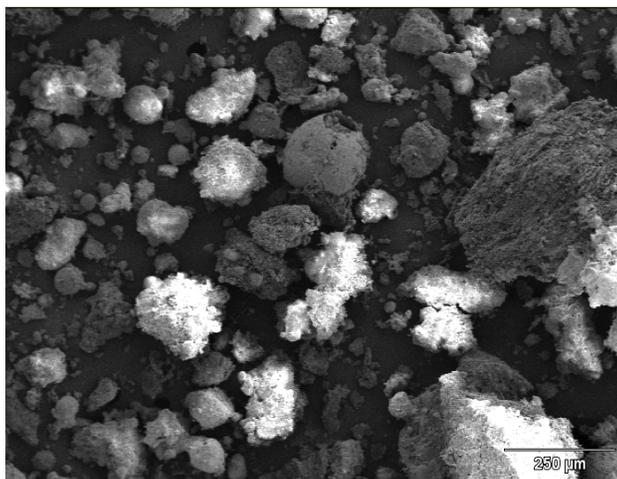


Figura 15: Micrografia da cinza com 2h de moagem.

A difração a laser das amostras com 2 horas de moagem está apresentada na Figura 16, e relaciona o valor cumulativo em relação ao diâmetro médio das partículas. Na análise por difração a laser foi utilizada a Densidade/Fator: $2.41 \text{ g/cm}^3 / 1.30$

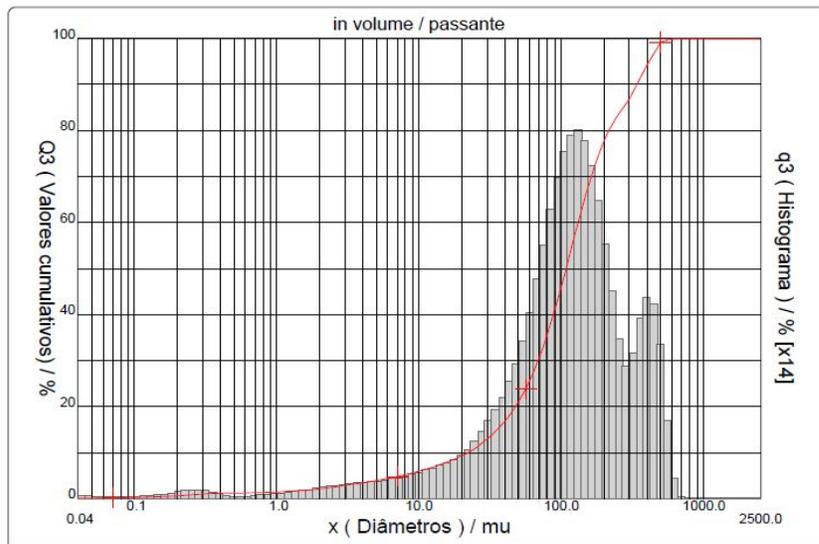


Figura 16: Distribuição de tamanho de partícula da cinza com 2h de moagem.

Mostra um diâmetro médio de 142,72 μm com uma distribuição bimodal. As partículas frágeis sofrem fraturas, as quais tendem a refiná-las com o aumento do tempo de moagem. Após 4 horas de moagem, a cinza apresentou partículas entre 70 e 300 μm como mostra a Figura 17.

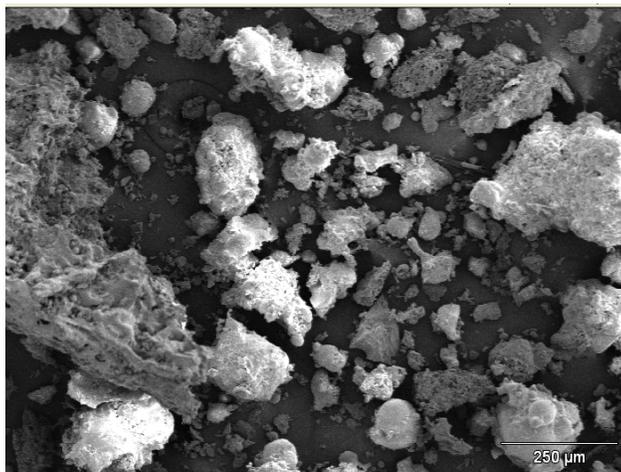


Figura 17: Micrografia da cinza com 4h de moagem.

Observa-se pouca diferença nas micrografias entre as figuras 15 e 17 sendo este resultado confirmado com a difração a laser mostrada na Figura 18.

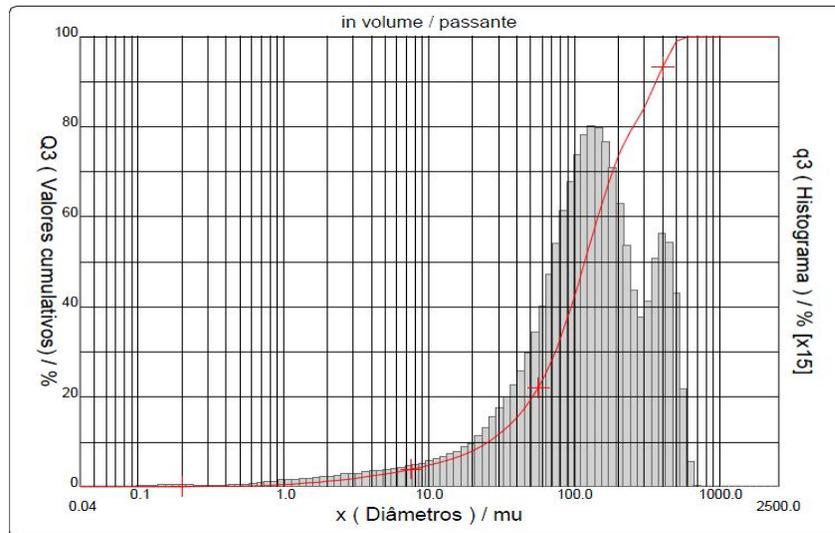


Figura 18: Distribuição de tamanho de partícula da cinza com 4h de moagem.

A distribuição continua bimodal com o diâmetro médio de 155,43 μm havendo um mínimo aumento das partículas devido a alguma soldagem da parte dúctil da cinza. Com o aumento do tempo de moagem, a capacidade das partículas de aceitar mais deformação plástica diminui. Como a soldagem é o mecanismo dominante no processo, a morfologia das partículas é alterada para aglomerados de partículas achatadas. A Figura 19 apresenta partículas próximas à faixa de 50 a 200 μm analisadas visualmente.

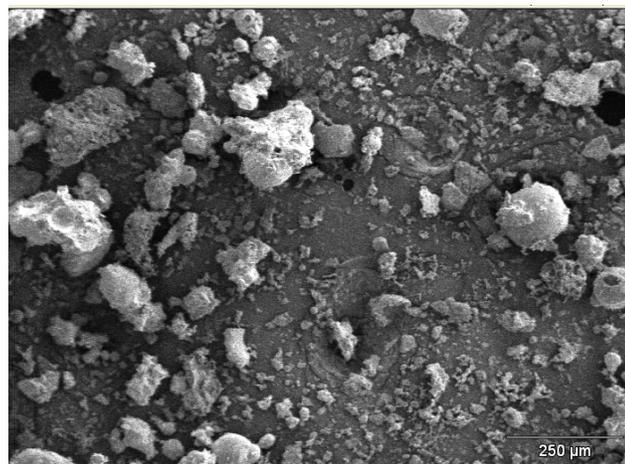


Figura 19: Micrografia da cinza com 8h de moagem.

As últimas etapas do processo de moagem envolvem a fratura das partículas, e resulta em uma maior deformação e/ou fragmentação das partículas.

Com a diminuição do tamanho das partículas fragmentadas, a aglomeração de partículas aumenta, aumentando assim a resistência à fratura. A Figura 20 demonstra diâmetro médio de 125,61 μm e distribuição modal.

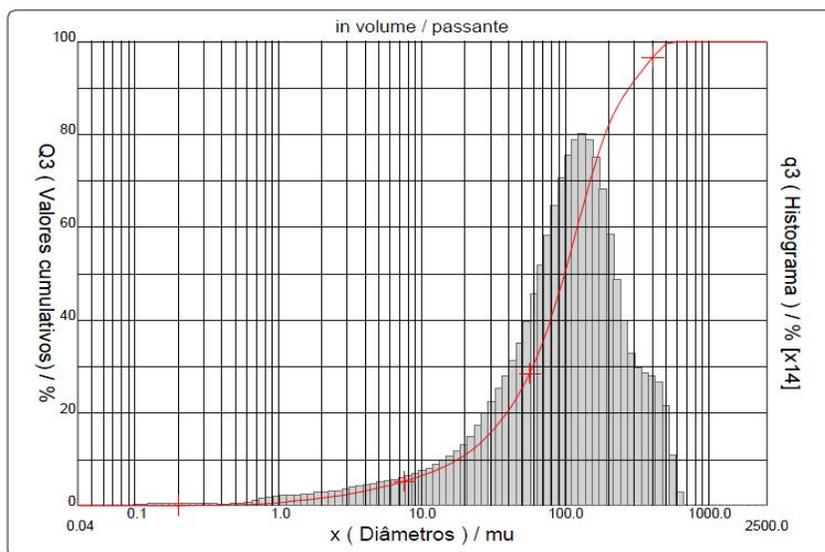


Figura 20: Distribuição do tamanho de partícula da cinza com 8h de moagem.

O aumento da resistência à fratura e maior coesão entre as partículas, com a diminuição do tamanho de partículas, causam aglomeração. A Figura 22 apresenta partículas com diâmetro médio de 73,88 μm . A diminuição no tamanho de partículas se dá através do aumento no tempo de moagem. A Figura 21 apresenta a micrografia da cinza pesada com 16 horas de moagem e a visível diminuição da partícula.

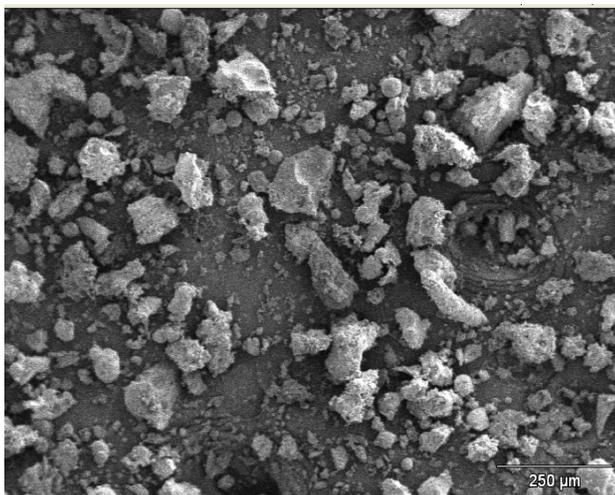


Figura 21: Micrografia da cinza com 16h de moagem.

A Figura 21 apresenta um tamanho visual entre 30 e 150 μm que pode ser identificado na Figura 22 uma modificação no formato do histograma na distribuição de tamanho de partícula.

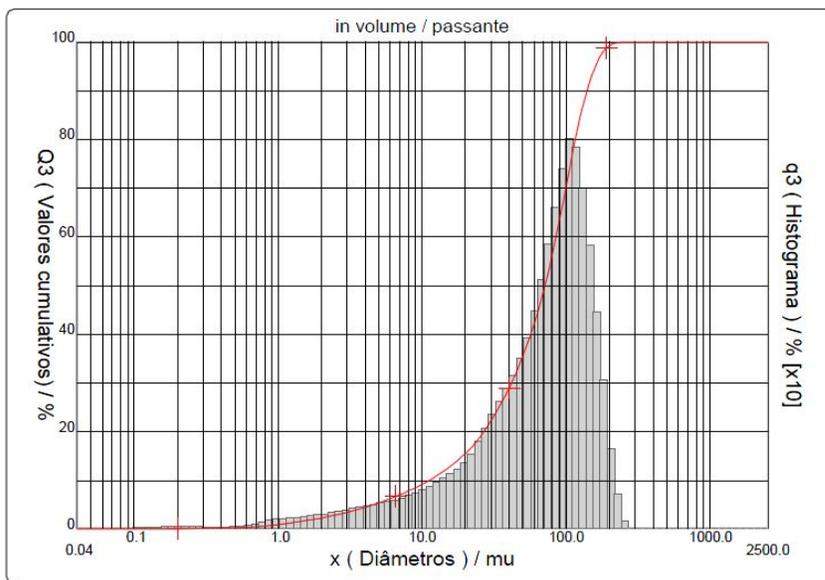


Figura 22: Distribuição de tamanho de partícula da cinza com 16h de moagem.

Observa-se na Figura 22 que o tamanho das partículas ficou maior que 200 μm , o que não é significativo. As distribuições de tamanho de partícula neste estágio de moagem começam a ficar mais importante devido à granulometria deste pó estar dentro da faixa normal da metalurgia do pó convencional, isto é, o pó de cinza pesada com tamanho passível até de comercialização desde que sua aplicação seja de extrema importância para um processo ou produto obtido por metalurgia do pó.

A Figura 23 exibe a micrografia do pó de cinza pesada com 32 horas de moagem. Esta figura demonstra claramente a diminuição das partículas de pó que atingiram faixa de tamanho entre 20 e 130 μm numa homogeneidade distribuída em toda a imagem.

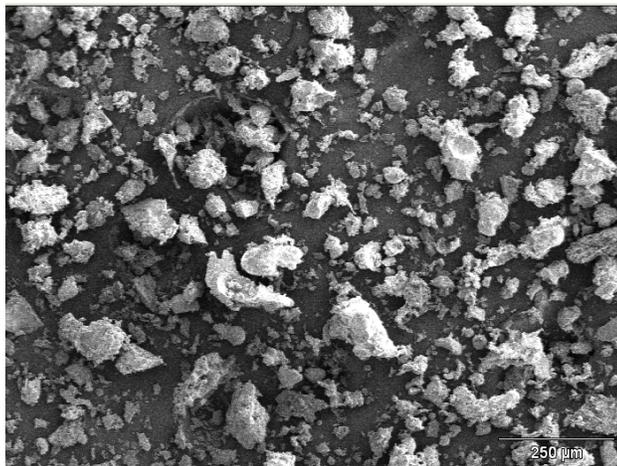


Figura 23: Micrografia da cinza com 32h de moagem.

A Figura 24 mostra o tamanho de partícula apresentado após 32 horas de moagem está totalmente dentro da faixa da metalurgia do pó convencional com um tamanho médio de 57,61 µm.

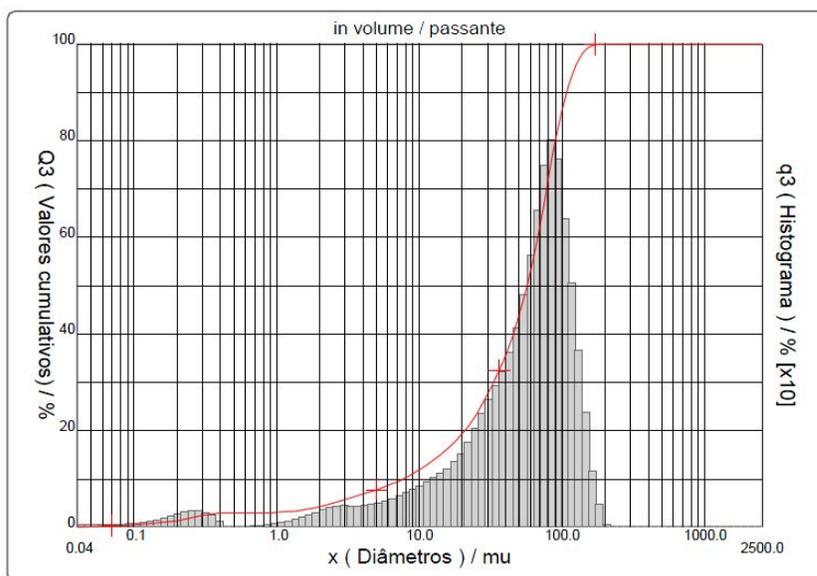


Figura 24: Distribuição de tamanho de partícula da cinza com 32h de moagem

A Figura 25 exibe a micrografia do pó de cinza pesada com 64 horas de moagem. Esta figura demonstra pouca alteração no tamanho das partículas de pó que atingiram faixa de tamanho entre 15 e 110 µm.

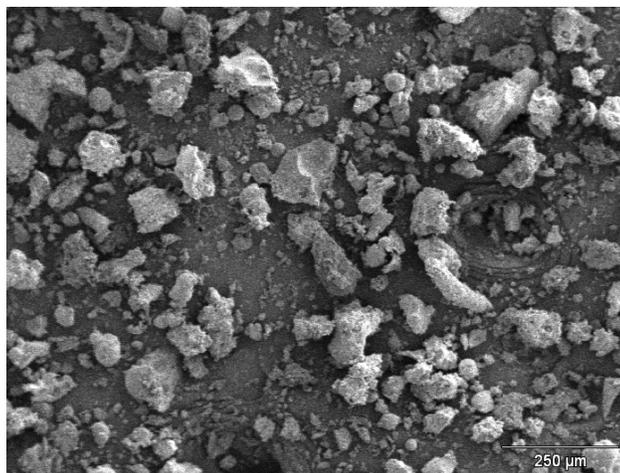


Figura 25: Micrografia da cinza com 64h de moagem.

A Figura 26 mostra o tamanho de partícula apresentado após 64 horas de moagem está totalmente dentro da faixa da metalurgia do pó convencional com um tamanho médio de 36,54 µm.

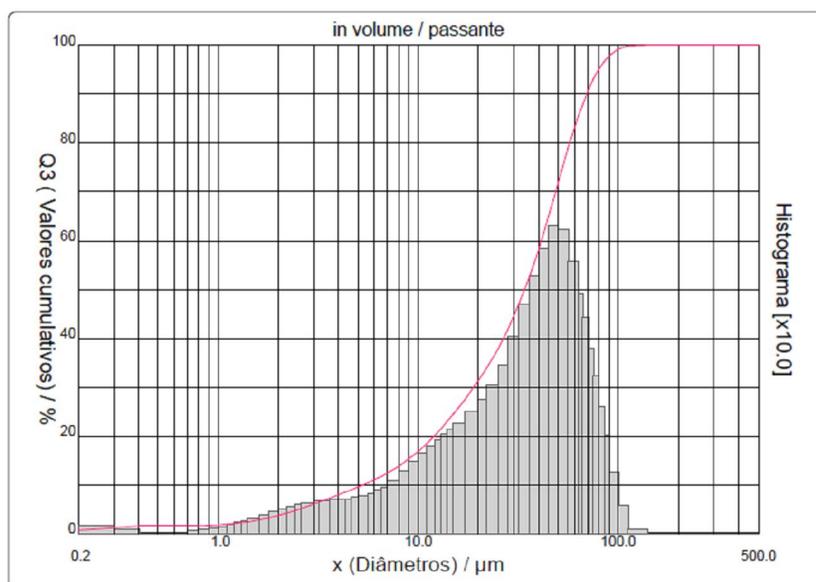


Figura 26: Distribuição de tamanho de partícula da cinza com 64h de moagem

Baseado no tamanho de partícula encontrado em cada ensaio os tamanhos característicos às proporções em que 10, 50 e 90 % do material são passantes foram determinados e representados respectivamente por D_{10} , D_{50} e D_{90} na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados da análise de tamanho de partícula por difração de laser da cinza pesada moída.

Horas de moagem	Diâmetro médio (μm)	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	Superfície específica (cm^2/g)
2	142,72	22,03	107,89	338,50	3816,97
4	155,43	25,53	117,24	361,35	1245,95
8	125,61	17,69	98,17	276,73	1574,83
16	73,88	11,16	71,07	139,16	2050,83
32	57,61	7,62	56,69	107,29	7756,15
64	36,54	5,24	33,95	69,46	-----

A partir dos resultados da Tabela 6 plotou-se o gráfico para visualizar a influência do tempo de moagem sobre o tamanho de partícula, como mostra a Figura 27.

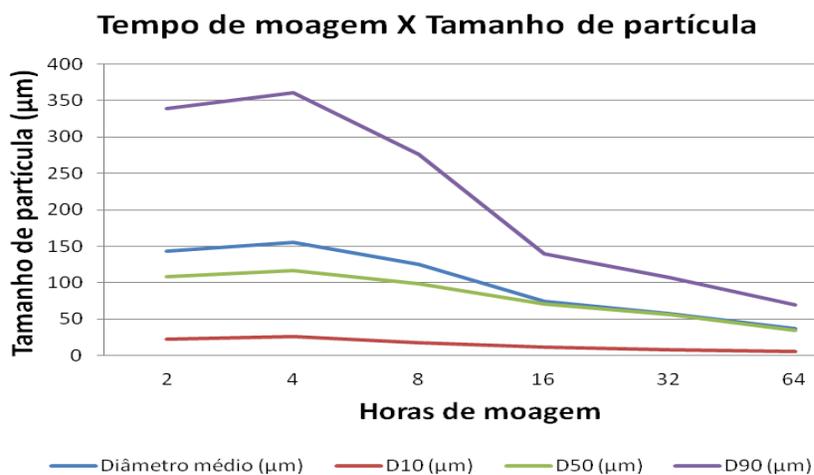


Figura 27: Influência do tempo de moagem no tamanho de partícula.

Pode-se verificar que à medida que o tempo de moagem aumenta, o tamanho de partícula torna-se menor.

4.2 Preparação das composições

Após a moagem dos pós, as amostras foram preparadas contendo aproximadamente 80% de cinzas, 20% de ferro e mais 4% de parafina para os diferentes tempos de moagem. A adição de parafina na preparação das composições serviu para a melhoria do empacotamento dos pós.

4.3 Densidade aparente

A densidade aparente foi feita com o pó solto (sem aplicação de pressão). As medidas de compressibilidade apresentaram aumento de densidade com o aumento da pressão, indicando uma boa densificação para ambas as misturas.

Com compósito pronto de Cinza-20Fe determinou-se a densidade média aparente do material, obtendo os valores em g/cm^3 , como mostra a Tabela 7.

Nota-se que a densidade aparente ficou entre 0,18 e 1,59 g/cm^3 .

Tabela 7: Densidade Aparente das composições de cinza

Composição da Cinza	Densidade Aparente (g/cm^3)
Cinza 2h + 20% Fe	1,59
Cinza 4h + 20% Fe	0,76
Cinza 8h + 20% Fe	0,65
Cinza 16h + 20% Fe	0,71
Cinza 32h + 20% Fe	0,72
Cinza 64h + 20% Fe	0,18

Pode-se perceber que com o aumento do tempo de moagem a densidade diminui, pois as partículas tornam-se menores e preenchem espaços vazios, aumentando o empacotamento.

4.4 Compactação

A compactação realizada foi em matriz cilíndrica para a determinação da curva de compressibilidade, pois a pressão de compactação foi obtida a partir desta curva, que norteará as próximas compactações, apresentando a pressão de trabalho na conformação dos pós de cinza-20Fe.

4.4.1 Curva de compressibilidade

A curva de compressibilidade apresenta a variação da densidade a verde em função da pressão de compactação, sendo o primeiro ponto da curva a densidade aparente.

A Figura 28 mostra o efeito da pressão de compactação na densidade relativa das amostras. Todas as amostras apresentaram aumento da densidade a verde com o aumento da pressão. A densidade relativa alcançou um valor máximo de $2,0 \text{ g/cm}^3$ para a amostra de 2 horas de moagem.

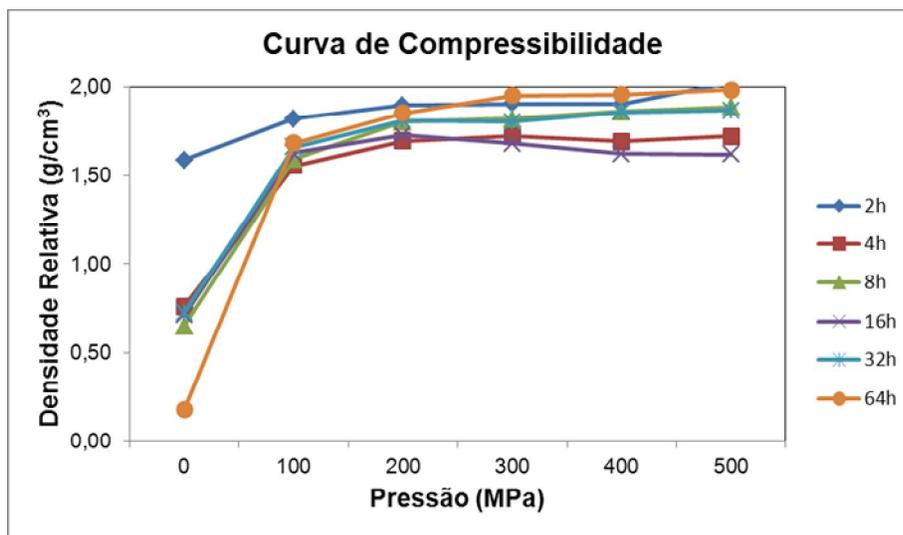


Figura 28: Curva de Compressibilidade das misturas Cinza-20Fe

Observa-se que no pó com 4 horas de moagem houve um aumento do tamanho da partícula mostrando possível soldagem dos constituintes dúcteis da cinza.

O pó moído por 2 e 4 horas pode estar com distribuição de tamanho de partícula mais variada, onde as partículas menores preenchem espaços vazios deixados pelas maiores, aumentando assim o empacotamento das partículas e a densidade a verde, como indicado na literatura [48].

A morfologia e o encruamento das partículas influenciam a compressibilidade dos pós. Partículas com morfologia achatada proporcionam maior capacidade de deformação durante a compactação, pois apresentam uma superfície específica maior e, conseqüentemente permitem a união mecânica entre as partículas [49].

4.5 Densidade a verde

Determinou-se a densidade a verde dos compósitos cinza-20Fe, nos

tempos de moagem: 2; 4; 8; 16; 32 e 64 horas, os dados para a composição do material e para o cálculo da densidade aparente das amostras de cinza encontram-se nos apêndices de A à F. A Figura 29 apresenta a densidade a verde e o desvio padrão da cinza com 2h de moagem que foi de aproximadamente $1 \pm 0,14 \text{ g/cm}^3$ com a pressão de 200 MPa. A amostra acima de 500 MPa rompeu.

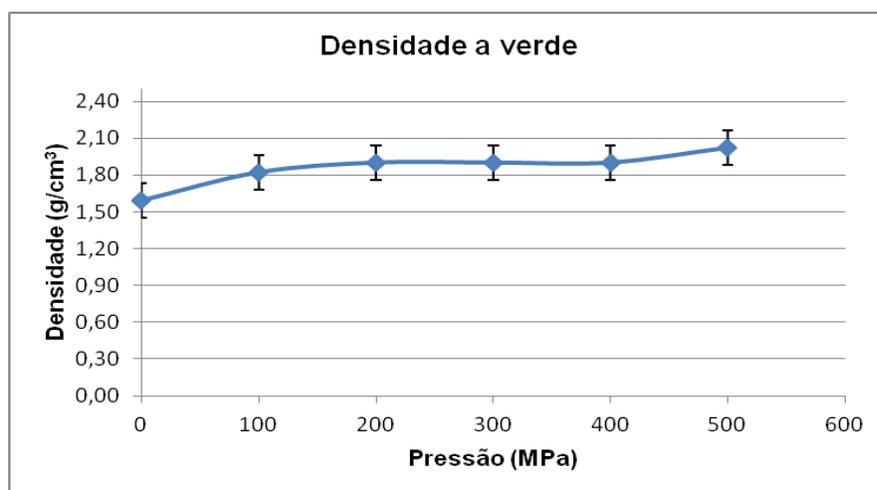


Figura 29: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 2h de moagem

A Figura 30 apresenta a densidade a verde da cinza com 4h de moagem que foi de aproximadamente $1 \pm 0,38 \text{ g/cm}^3$ com a pressão de 200 MPa. A amostra acima de 600 MPa fraturou.

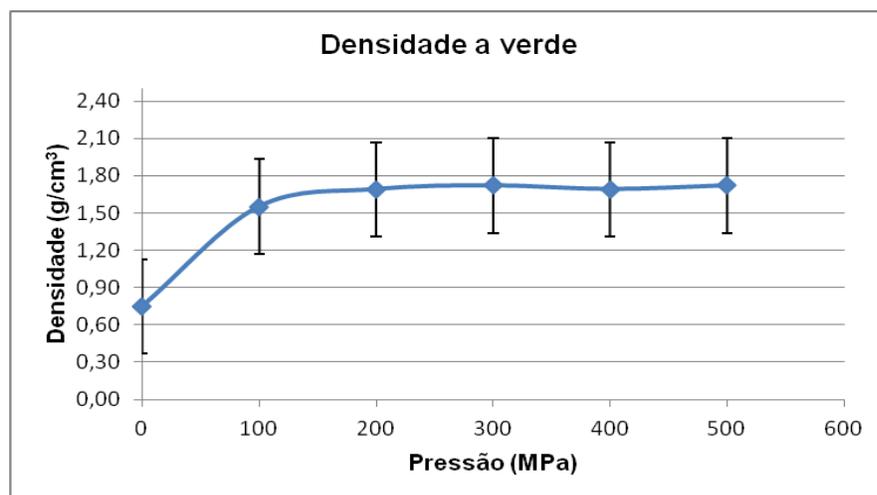


Figura 30: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 4h de moagem

Através da Figura 31 é possível verificar densidade a verde da cinza com 8h de moagem que foi de aproximadamente $1 \pm 0,48 \text{ g/cm}^3$ com a pressão de 200 MPa. A amostra acima de 500 MPa fraturou.

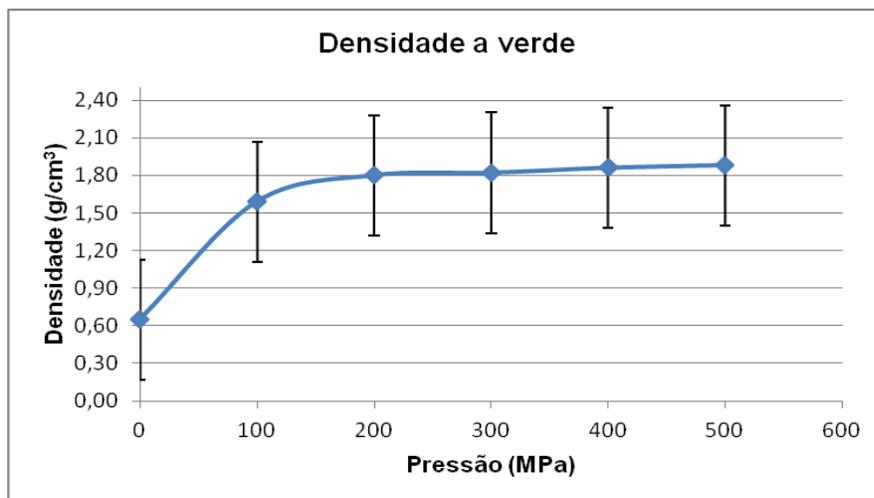


Figura 31: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 8h de moagem

A densidade a verde aproximadamente $1 \pm 0,39 \text{ g/cm}^3$, para a cinza com 16h de moagem, Figura 32. A amostra acima de 600 MPa rompeu e a densidade a verde foi atingida com a pressão de 200MPa.

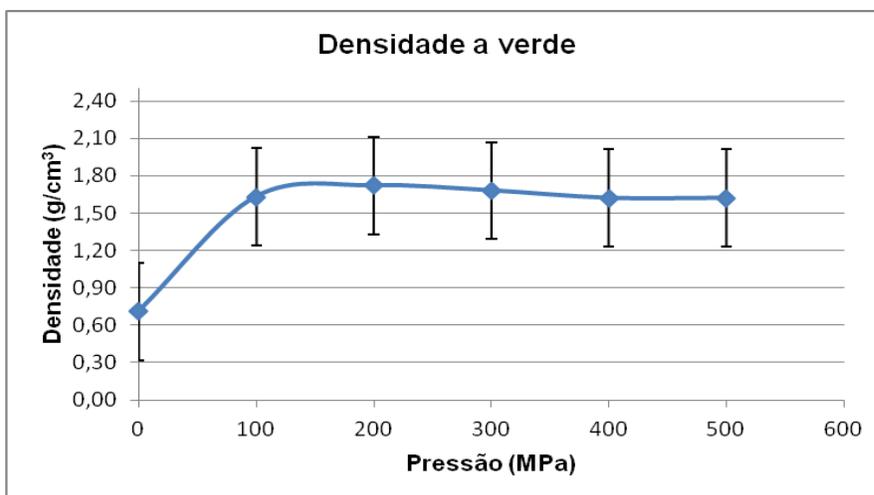


Figura 32: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 16h de moagem

A Figura 33 apresenta a densidade a verde da cinza com 32h de moagem que foi de aproximadamente $1 \pm 0,44 \text{ g/cm}^3$ com a pressão de 200 MPa. A amostra acima de 600 MPa fraturou.

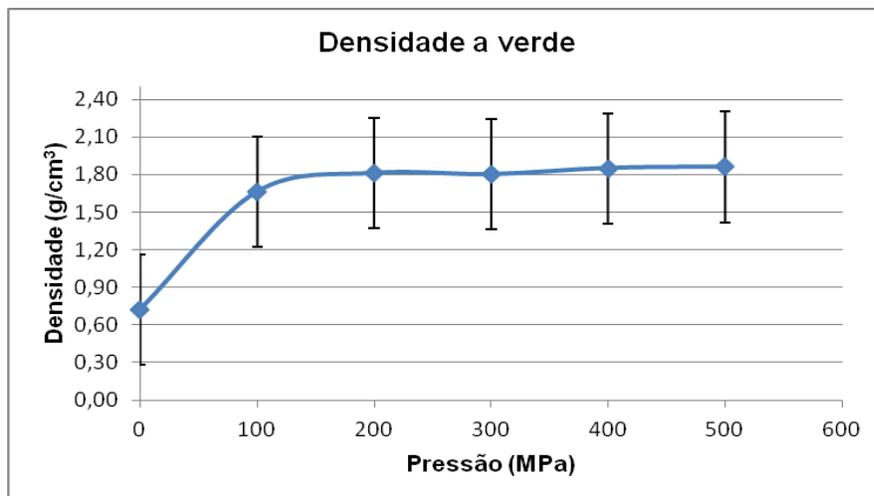


Figura 33: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 32h de moagem

Para a densidade a verde aproximadamente $1 \pm 0,49 \text{ g/cm}^3$, para a cinza com 64h de moagem, Figura 34. A amostra acima de 600 MPa rompeu e a densidade a verde foi atingida com a pressão de 300MPa.

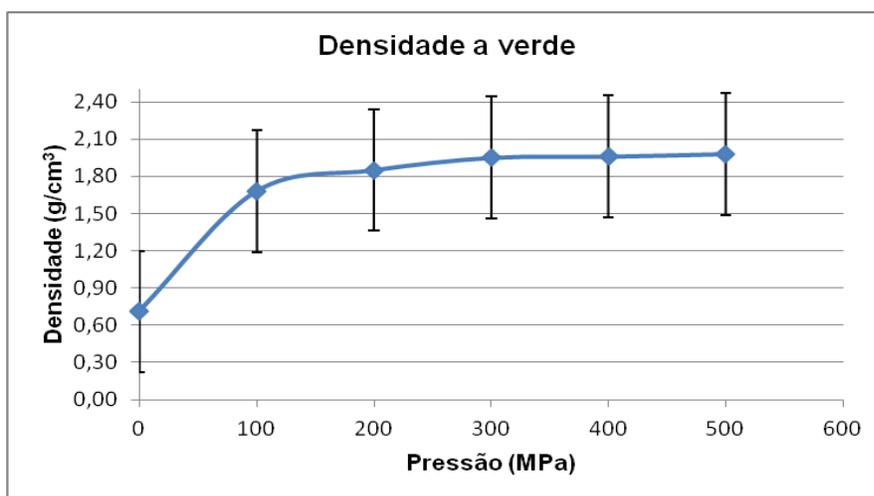


Figura 34: Densidade a verde e desvio padrão das amostras de cinza com 64h de moagem

A principal variável que afeta a compactação é a compressibilidade do pó, que pode ser definida como a extensão segundo a qual uma massa de pó pode ser densificada pela aplicação de pressão. A compressibilidade é uma característica importante, pois determina a pressão a ser exercida pelo ferramental para se conseguir uma determinada densidade da peça [24].

Ainda segundo a literatura [24], os pós quando submetidos à compressão se comportam da seguinte forma: no estágio inicial com a introdução de força

mecânica, ocorre um rearranjo das partículas soltas para um denso empacotamento. Subsequentemente, os pontos de contatos se deformam com o aumento da força mecânica. Finalmente, as partículas sofrem ampla deformação plástica.

O princípio do empacotamento de partículas consiste basicamente na seleção de tamanhos adequados de partículas, e no proporcionamento entre as quantidades desses tamanhos, visando obter compactados com densidade controlada. [50].

A densidade a verde influencia na qualidade do material após a sinterização, ou seja, quanto maior a densidade obtida na compactação melhores serão as características mecânicas do material, [50]

Distribuições de tamanho de partículas que favorecem a obtenção de compactos densos apresentam algumas vantagens em relação a estruturas com menor grau de empacotamento, como menor retração durante a queima e melhor sinterabilidade, já que os poros na estrutura são menores, podendo ser eliminados mais facilmente [50].

4.6 MEV / EDS do Sinterizado

As microestruturas das amostras foram avaliadas através da análise de micrografia e EDS.

As amostras com 2; 4; 8; e 64 horas de moagem não apresentaram boa contração na sinterização, as quais sofreram fragmentação no processo de polimento metalográfico não sendo possível a caracterização delas através da análise micrográfica e EDS.

Um tamanho de partículas grande tem um maior impacto sobre o estágio final de sinterização, que afeta a separação dos contornos de grãos e poros, permitindo que o crescimento de grãos inicie mais cedo na sinterização, resultando em uma menor densidade final (49).

A Figura 35 com aumento de 750x mostra a micrografia obtida no MEV da amostra de cinza com 32h de moagem com 20% de ferro sinterizada. É possível avaliar de forma qualitativa e indicada pela seta vermelha como sendo uma partícula de ferro e a seta amarela indica sílica e outros óxidos como alumina, esta composição pode ser confirmada pelo espectro de EDS mostrada nas Figuras 34 e 35.

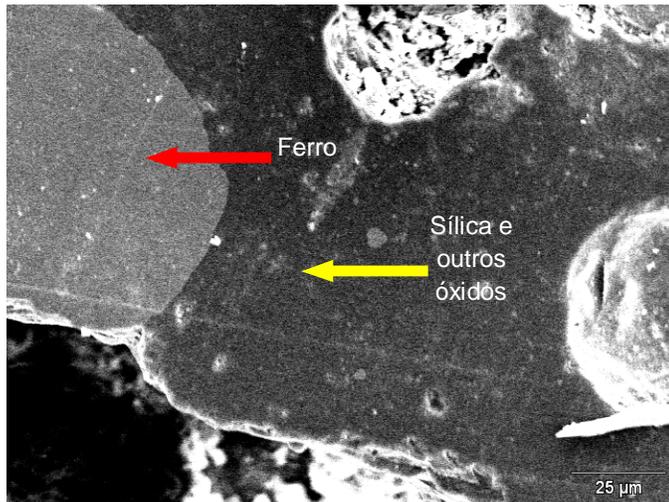


Figura 35: Micrografia da amostra sinterizada com 32h de moagem (750x)

A seta vermelha identifica o aglomerante metálico e a amarela, as regiões onde ocorreram difusão de material proveniente das cinzas, em direção ao aglomerante.

Essa interação de material proveniente das partículas de cinzas difundido no aglomerante metálico, apresentadas na Figura 33, justifica o aumento da dureza e conseqüentemente da resistência mecânica deste compósito.

A Figura 36 mostra o resultado da análise por EDS da região do aglomerante metálico, indicado pela seta vermelha na Figura 33.

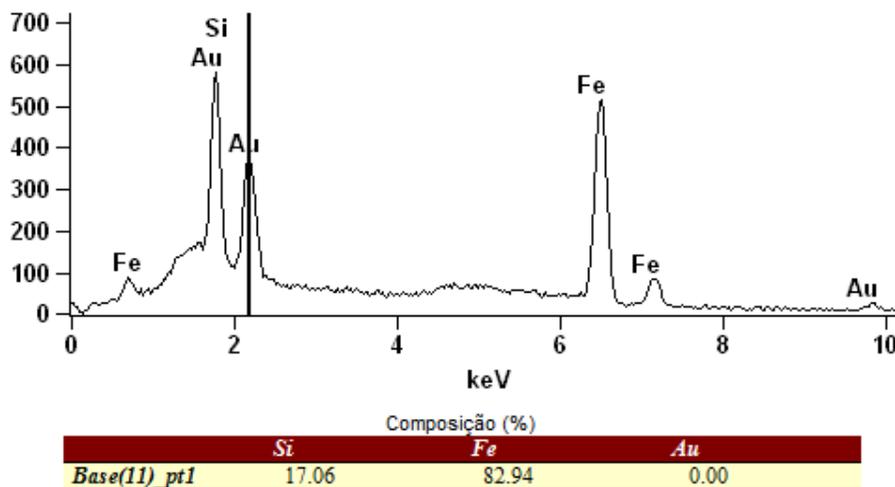


Figura 36: Espectro de EDS indicando ferro

A Figura 37 mostra o resultado da análise por EDS da região com partícula de cinza, indicada pela seta amarela na Figura 33.

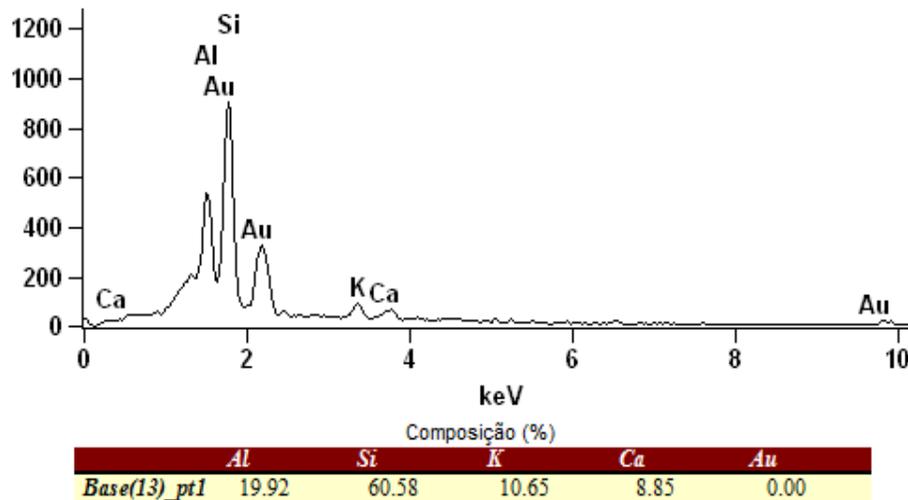


Figura 37: Espectro de EDS indicando sílica e outros óxidos

A Figura 38 mostra a micrografia da amostra com 32h de moagem sinterizada onde está indicada pela seta vermelha uma veia de carbono, esta composição pode ser confirmada pela Figura 38 através do espectro de EDS.

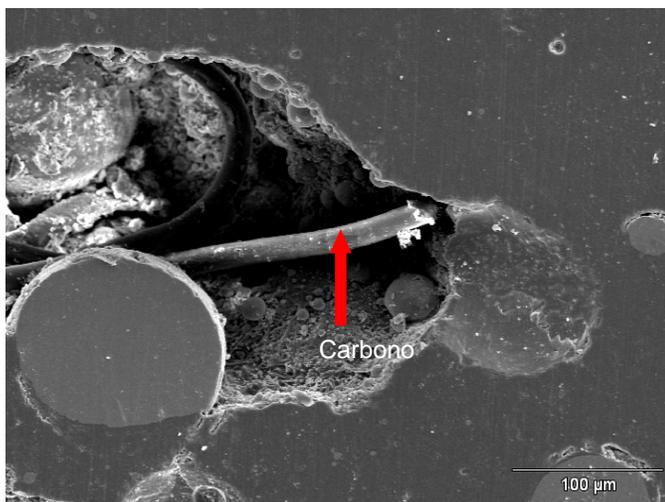


Figura 38: Micrografia da amostra sinterizada com 32 h de moagem (1000x)

Através da Figura 39 é possível comprovar a composição da veia de carbono indicada pela seta vermelha na Figura 36.

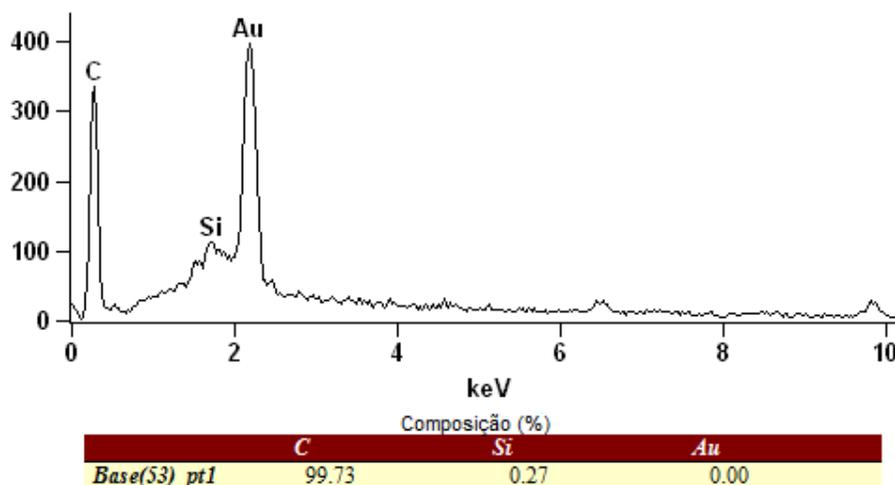


Figura 39: Espectro de EDS da veia de Carbono

Para as amostras com 64 horas de moagem, após a sinterização, conforme Figura 40, obteve-se uma baixa sinterabilidade, não resistindo ao processo de polimento metalográfico, as amostras fragmentaram.



Figura 40: Amostras com 64 horas de moagem sinterizadas

Pode-se verificar que à medida que o tempo de moagem aumenta, o tamanho de partícula torna-se menor. Entretanto, se a moagem é prolongada após 32 horas, o tamanho de partícula tende a aumentar, provavelmente devido à formação de aglomerados durante a moagem.

Um tamanho de partículas grande tem um maior impacto sobre o estágio final de sinterização, que afeta a separação dos contornos de grãos e poros, permitindo que o crescimento de grãos inicie mais cedo na sinterização, resultando

em uma menor densidade final (49).

4.7 Densidade do Sinterizado

Para melhor análise dos resultados referentes à densidade do sinterizado da amostra de cinza com 32 horas de moagem, as mesmas foram plotadas no gráfico apresentado na Figura 41.

Pode-se observar um aumento da densidade com o aumento da pressão de compactação.

Nota-se que a densidade do sinterizado estabiliza-se com a pressão de compactação de 300 MPa, com isso comprova-se que para a amostra de cinza com 32 horas de moagem a pressão na qual a mistura compactou melhor, mostrando a densificação do material, foi de 300MPa.

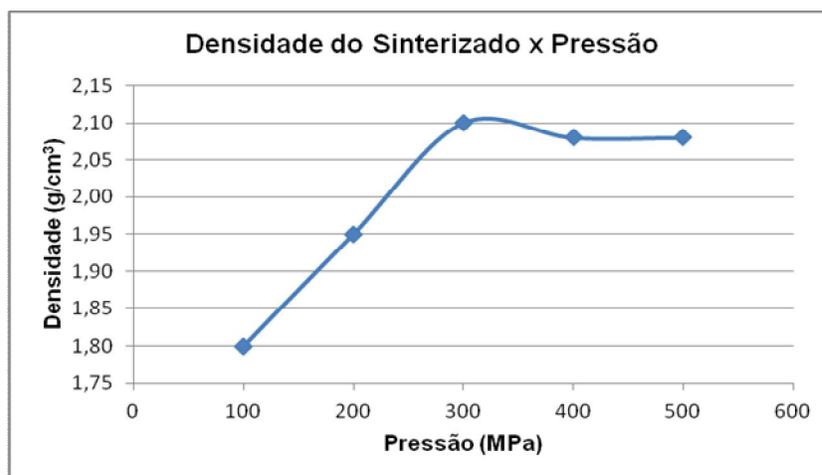


Figura 41: Densidade do sinterizado da amostra de cinza com 32 horas de moagem

Conforme literatura [50] quanto menor o tamanho de partícula, maior a influência das forças decorrentes de fenômenos superficiais. A maior espessura relativa da dupla camada elétrica nas partículas finas, associada à baixa velocidade de formação de parede favorece o posicionamento das mesmas segundo um arranjo mais ordenado no compacto o que favorece a formação de uma estrutura mais fechada. Daí a menor densidade de empacotamento.

4.8 Microdureza

Na Figura 42 podem-se ver os resultados obtidos das medições de microdureza das amostras sinterizadas da cinza com 32 horas de moagem.

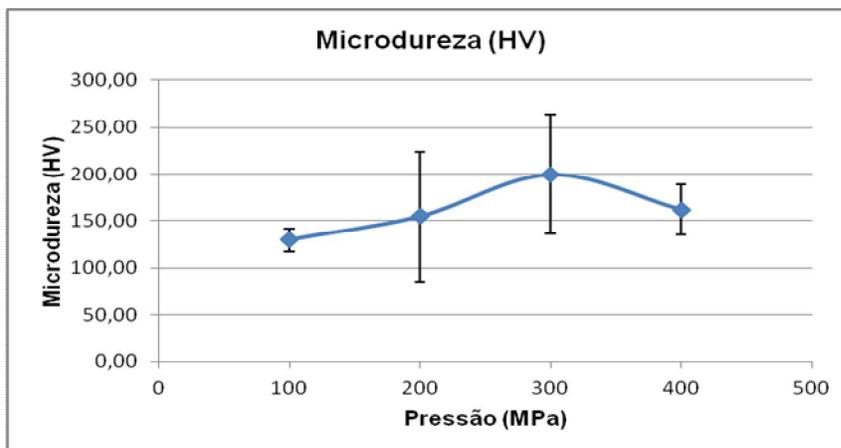


Figura 42: Microdureza das amostras com 32 horas de moagem

Os valores de microdureza foram aumentando em função da pressão, alcançando o valor de 199 ± 64 HV na pressão de compactação de 300 MPa. Após 300 MPa a microdureza começa a diminuir. O decréscimo nos valores de microdureza é provavelmente devido ao menor valor de densidade.

Isso provavelmente ocorreu devido a mudanças nas características de empacotamento do pó durante a compactação, que foram causados pelo aumento nos níveis de deformação e encruamento das partículas, e também devido à forma e distribuição do tamanho de partículas (49).

As variações da dureza da amostra sinterizada da cinza com 32 horas de moagem em função da pressão de compactação empregadas nas amostras a verde mostram que a dureza apresenta tendência a diminuir para pressões de compactação acima de 300 MPa.

5 CONCLUSÕES

Para os parâmetros utilizados neste trabalho, os melhores resultados obtidos para o compósito cinza-20Fe, foram alcançados para o tempo de 32 horas de moagem das cinzas.

O tempo de moagem produz a redução do tamanho das partículas seguida de formação de aglomerados com tamanhos menores do que os elementos utilizados na obtenção dos compósitos. Além disso, os resultados mostraram que o controle do tamanho de partículas dos pós pode ser feito através do tempo de moagem.

O tempo de moagem tem grande efeito, tanto na forma, no tamanho e na homogeneidade dos aglomerados. As imagens de MEV permitiram visualizar os efeitos do processamento de moagem de alta energia, como a alteração de morfologia das partículas e o seu refinamento, além da formação de aglomerados.

O aumento da densidade com o aumento da pressão de compactação indica uma boa densificação para as misturas.

Todas as misturas apresentaram a curva típica de compressibilidade, na qual a densidade aumenta com o aumento da pressão de compactação.

O tempo de moagem influenciou na aglomeração das partículas, sendo que para 2; 4 e 8 horas de moagem a aglomeração foi pequena, para 16 e 32 horas foi mais alta. Isso influenciou significativamente a sinterização do compósito já que pós com partículas aglomeradas dificultam o processo de sinterização.

O aumento da densidade do sinterizado resulta no aumento da microdureza, valores para a amostra de cinza com 32 horas de moagem foram de 199 ± 64 HV com densidade de $2,10 \text{ g/cm}^3$.

Tempos de moagem mais longos, após 32 horas de moagem, proporcionaram um efeito deletério nas propriedades do material. Isso ocorreu

devido a mudanças nas características de empacotamento do pó durante a compactação, que foram causados pelo aumento nos níveis de deformação e encruamento das partículas.

Os resultados mostraram através da avaliação das características físicas e mecânicas do compósito, que nas condições deste trabalho se tornam inviáveis a obtenção do compósito cinza-20Fe a partir da cinza pesada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1 – Utilizar Cobalto (Co) como aglomerante no compósito junto da cinza pesada;
- 2 – Métodos de oxidação para diminuição do carbono na cinza pesada;
- 3 – Pré-sinterizar as amostras de cinza compactada para a retirada do carbono e realizar moagem, processar novamente o pó e produzir por metalurgia do pó;
- 4 - Analisar a mistura de cinza pesada com outros metais, como o cobre e o níquel;
- 5 – Realizar análise de custos do processo;
- 6 – Estudar diferentes porcentagens da cinza pesada + ferro;
- 7 – Realizar a caracterização da cinza pesada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LEANDRO, R. P.; FABRI, G. T. P. **Aproveitamento da cinza pesada de carvão mineral na construção de bases e sub-bases de pavimentos flexíveis**. 2005.

Disponível em:

<http://www.cbtu.gov.br/monografia/2009/trabalhos/artigos/infraestrutura/4_131_AC.pdf> Acesso em 29 fev. 2012.

[2] CORRÊA, D. C. **Usinabilidade de mancais bimetálicos: influência do avanço no desgaste e na formação de rebarbas**. 2002. 155f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). PUC Minas (Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais) Minas Gerais. 2002.

[3] GOULARTI FILHO, A. **Formação, expansão e desmonte parcial do complexo carbonífero catarinense**. História & Perspectivas, Uberlândia (40): 251-267, jan. - jun.2009.

[4] TRACTEBEL ENERGIA. **Visão institucional TBLE e Complexo Jorge Lacerda**, 2008. Disponível em:

Disponível em:

<http://www.satc.edu.br/abcm/palestras/curso_carvao_mineral/modulo5/painel4.pdf> Acesso em 05 mar. 2012.

[5] RHODE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N.I.W. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil – Aspectos técnicos e ambientais**. vol.1 Porto Alegre: CIENTEC, 2006.

[6] POZZOBON, C.E. **Aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no Complexo Termelétrica Jorge Lacerda**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

[7] LEANDRO, R. P. **Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis**.

2005. 170 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

[8] FUNGARO, D. A.; SILVA, M. G. Utilização de zeólita preparada a partir de cinza residuária de carvão como adsorvedor de metais em água. **Química Nova**, Vol. 25, nº 6, p. 1081-1085, 2002.

[9] DA SILVA, M. V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água**. 2011. 132 f.

Dissertação de Mestrado (Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais). Autarquia associada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

[10] SZELIGA, L.; ARAÚJO, Z. M. **Aplicabilidade de resíduos e rejeitos ambientais para aproveitamento em pavimentação**. Disponível em:

<http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2011/Resumos/CTC/CIV/CIV-Lucianna%20Szeliga%20e%20Zalder%20Montenegro%20de%20Ara%C3%BAjo.pdf> Acesso em 15 mar. 2012.

[11] SIQUEIRA, J. S. **Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: produção de argamassas**. 2011. 92f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química). Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.

[12] LEANDRO, R. P. **Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis**.

Disponível em:

<http://www.cbtu.gov.br/monografia/2009/trabalhos/artigos/infraestrutura/4_131_AC.pdf>

Acesso em 20 mar. 2012.

[13] ADRIANO, D.C.: PAGE, A.L.: ELSEEWI, A.A.: CHANG, A.C. Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: a review. **Journal of Environmental Quality**.V.9, p.333-344, 1980.

[14] QUEROL X. *et al.* Synthesis of zeolites from coal fly ash: in overview. **International Journal of Coal Geology**, v.50, p.413-423, 2002.

[15] MARTINS, J. L. **Aproveitamento de cinza de carvão mineral na agricultura**. 2001. 99 f. Tese de Doutorado (Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

[16] DEPOI, F.S.; POZEBON, D.; KALKREUTH, W.D. Chemical characterization of feed coals and combustion-by-products from Brazilian power plants. **International Journal of Coal Geology** V. 76, p. 227-236, 2008.

[17] FERRET, L.S. **Zeólitas de cinzas de carvão: síntese e uso**. 2004. 154f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

[18] SANTOS, W. **Avaliação da cinza “pesada” gerada no complexo termoeletrico jorge lacerda para uso em aterros de trecho da duplicação da BR-101**. 2008. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro Civil) Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2008.

[19] DEPOI, F. S. **Desenvolvimento de métodos analíticos para a caracterização dos carvões brasileiros e suas cinzas**. 2007. 61f. Dissertação de Mestrado (Química) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

[20] LEVANDOWSKI, J.; KALKREUTH, W. Chemical and petrographical characterization of feed coal, fly ash and bottom ash from the Figueira Power Plant, Paraná, Brasil. **International Journal of Coal Geology**. 77, p. 269-281, 2009.

- [21] WANG, K.S., WU, H. Environmental-benign utilization of fly ash as low-cost adsorbents. **Journal of Hazardous Materials**, V. B136, p. 482-501, 2006.
- [22] NEVES, M. D. M. **Sinterização de misturas de pós de ligas de ferro para aplicações automotivas**. 2005. 131 f. Tese de Doutorado (Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais). Autarquia associada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- [23] KNEWITZ, F. L. **Estudo comparativo de amostras de NiTi produzidas por metalurgia do pó**. 2009. 159 f. Dissertação de Mestrado UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande Sul). Porto Alegre, 2009.
- [24] TORRES, C. S. **Estudo da Moagem de Alta Energia e Sinterização de Metal Duro WC-Ni**. 2009. 81 f. Dissertação de Mestrado. PPGEM UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Porto Alegre, 2009.
- [25] SAVI, J. R. **Efeito da adição de Nb, Mo, Cr e Ti na microestrutura do metal duro WC-6Co**. 2011. 103 f. Dissertação de Mestrado. PPGEM UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Porto Alegre, 2011.
- [26] MORO, N.; AURAS, A. P. **Processos de fabricação: Metalurgia do pó e o futuro da indústria**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [27] DELFORGE, D. Y. M. *et al.* Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais? **Metalurgia do pó**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(1): 95-100, jan. mar. 2007.
- [28] SILVA J. F., **Estudo da Síntese e Sinterização de Pós Compósitos do Sistema Ta-Cu**. 2008. 70 f. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.
- [29] PINTO, G. B. **Análise do Efeito do Tempo da Moagem de Alta Energia no Tamanho de Cristalito e Micro deformação da Rede Cristalina do WC-Co**. 2008. 82 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.
- [30] MARTINS, V. **Estudo das propriedades mecânicas dos compósitos WC-6Co, WC-10Co, WC-20Co, WC- 6Co-6Ni, WC-6Co-12Ni obtidos por metalurgia do pó convencional para aplicação em anéis de selos mecânicos**. 2010, 125f. Dissertação de Mestrado (PPG3M). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

- [31] ZILNYK, K; CINTHO, O. M. Influência da Moagem de Alta Energia na porosidade de produtos da metalurgia do pó. **4º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais**. 25-28 Agosto 2008.
- [32] LUCIANO, A. **Síntese e caracterização de compostos obtidos por moagem de alta energia do sistema Fe-Mn₂O₃**. 2004, 144f. Dissertação de Mestrado (Física). Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2004.
- [33] FLORES, Y. C. **Produção de aditivos minerais finos a nanométricos por moagem de alta energia e avaliação de sua atividade pozolânica**. 2010, 141f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.
- [34] LEITE, D. W. **Obtenção do cermet Ni-ZrO₂ por moagem de alta energia**. 2010, 53f. Dissertação de Mestrado (Tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2010.
- [35] FLORES, Y. C.; TAVARES, L. M. Otimização da dispersão na moagem de quartzo em moinho atritor. **Painel PEMM 2012** - 24, 25 e 26 de outubro de 2012 – PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [36] TORRES, C. S.; SHAEFFER, L. Efeito da moagem de alta energia na morfologia e compressibilidade do compósito WC-Ni. **Revista matéria**. v. 15, n. 1, pp. 088 – 095, 2010.
- [37] PURGATO, R. T.; MARCHI, J.; BRESSIANI, J. C.; BRESSIANI, A. H. A. Sinterização de diferentes carbetos com aditivos formadores de fase líquida. **Anais do 50º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. Proceedings of the 50th Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society. 22 a 25 de maio 2006. Blumenau, SC
- [38] RIBEIRO, J. L. S. **Fresamento do aço VHsuper nos estados recozido e temperado com metal duro e cermet**. 2007. 244 f. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- [39] SILVEIRA, J. F. **fresamento toroidal do aço ABNT H13 endurecido, com ferramentas de cermet e de metal duro**. 2002. 101 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2002.
- [40] SHANYONG, Zhang. Titanium carbonitride-based cermets: processes and properties. **Materials Science and Engineering**, Singapura, p.141-148, out. 1992
- [41] Ligas de Cermet – **Apostila do curso de Engenharia de Materiais** - UFRGS-2010, disponível em < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABTzcAJ/ligas-cermet>> acessado em 07/03/2012.

[42] CLAUSER, H. R. **Industrial and engineering materials**. New York: McGraw-Hill, 1975. 440p.

[43] YUHONG, Xiong. et al. A streamlined life cycle assessment on the fabrication of WC-Co cermets. **Journal of Cleaner Production**, Califórnia, p.1-9, mai. 2007.

[44] C., Tien. Magnetic properties of a cermet on the base of Al_2O_3 . **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. Russia, p.147-151, jun. 2000.

[45] SHIQUAN Z.; WEI, Z.; WEIHAO, X.; **Microstructure and properties of the cermets based on Ti(C,N)**, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei, China, Janeiro 2008.

[46] FIGUEREDO, A. Martim de. **Comportamento mecânico de cermets U_3O_8 -Al**. Dissertação de mestrado INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Orientador Dr. Paulo Iris Ferreira. São Paulo, 1982.

[47] CALLISTER, J.; W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002. 589p.

[48] AL-QUERESHI, H. A.; GALIOTTO, A. e KLEIN, A.N. On the Mechanical of Cold Die Compaction for Powder Metallurgy. **Journal of Material Processing Technology**, Vol. 166, p. 135-143, 2005.

[49] HEWITT, S. A.; LAOUI, T. e KIBBLE, K. K. Effect of Milling Temperature on the Synthesis and Consolidation of Nanocomposite WC-10Co Powders. **Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, Vol.. 27, p. 66-73, 2009.

[50] ORTEGA, Fernando dos Santos et. al. Influência dos modelos de Alfred e de Andreasen sobre a microestrutura e densidade a verde de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem. **Cerâmica**. São Carlos. Vol. 43, p.183 – 189, 1997.

ANEXOS

ANEXO A – Relatório da análise granulométrica da cinza com 2h de moagem



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 2h
 Tipo de produto : Pó
 Cliente : LdTM
 Comentários :
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante :
 Operador : Malu
 Empresa : UFRGS - LACER
 Localização : Porto Alegre - RS
 Data : 01/02/2013 Hora : 10:29:05
 Índice med. : 295

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 130
 Diâmetro a 10% : 22.03 mu
 Diâmetro a 50% : 107.89 mu
 Diâmetro a 90% : 338.50 mu
 Diâmetro médio : 142.72 mu
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator : 2.41 g/cm³ / 1.30
 Superfície específica : 3816.97 cm²/g
 Diluição automática : Sim / Não
 Medida./Limp. : 60/60/8
 SOP : UFRGS L

Valores cumulativos particulares

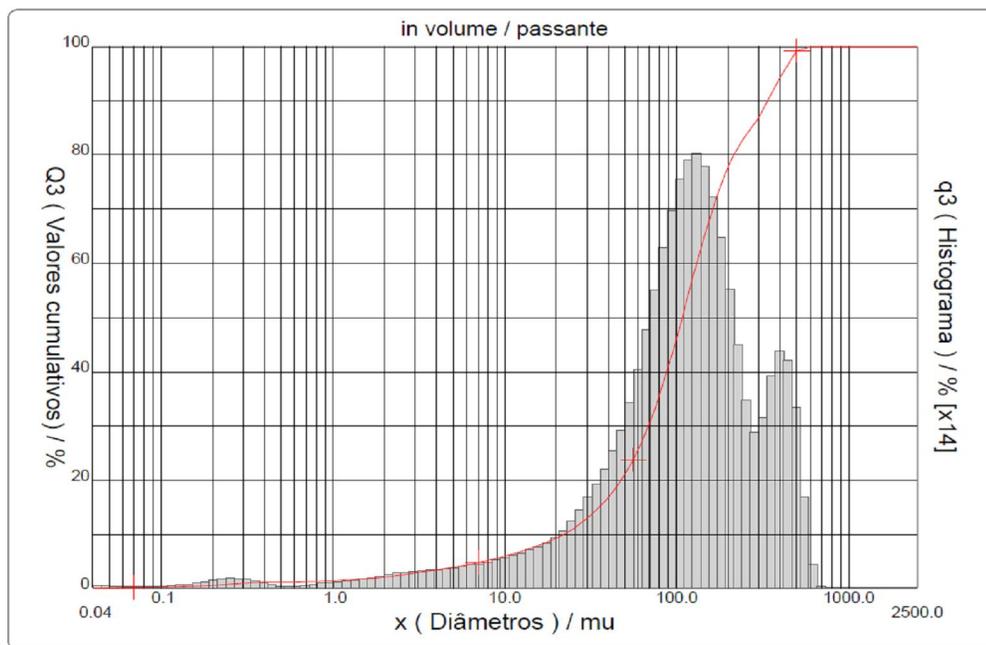
x	0.10	1.00	10.00	100.0	1000.0
Q3	0.23	1.46	5.99	46.19	100.00

in volume / passante

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	600.00



ANEXO B – Relatório da análise granulométrica da cinza com 4h de moagem



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 4h
 Tipo de produto : Pó
 Cliente : LdTM
 Comentários :
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante :
 Operador : Malu
 Empresa : UFRGS - LACER
 Localização : Porto Alegre - RS
 Data : 01/02/2013 Hora : 10:49:27
 Índice med. : 298

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 128
 Diâmetro a 10% : 25.53 mu
 Diâmetro a 50% : 117.24 mu
 Diâmetro a 90% : 361.35 mu
 Diâmetro médio : 155.43 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : 2.41 g/cm³ / 1.30
 Superfície específica : 1245.95 cm²/g
 Diluição automática : Sim / Não
 Medida./Limp. : 60/60/8
 SOP : UFRGS L

Valores cumulativos particulares

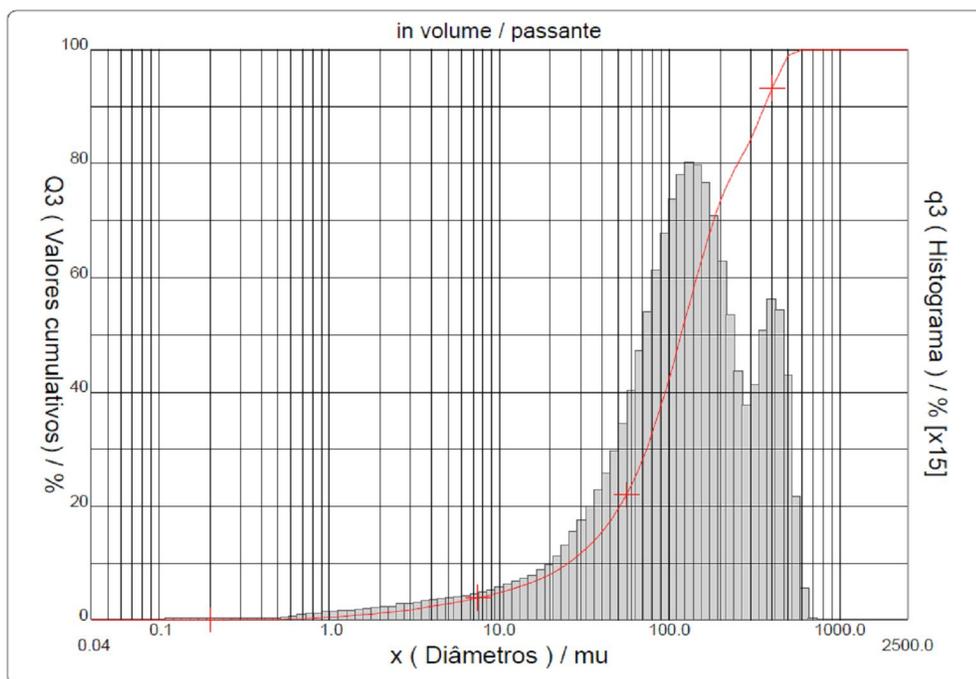
x	0.10	1.00	10.00	100.0	1000.0
Q3	0.00	0.55	4.85	42.52	100.00

in volume / passante

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	600.00



ANEXO C – Relatório da análise granulométrica da cinza com 8h de moagem



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 8h
 Tipo de produto : Pó
 Cliente : LdTM
 Comentários :
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante :
 Operador : Malu
 Empresa : UFRGS - LACER
 Localização : Porto Alegre - RS
 Data : 01/02/2013 Hora : 11:05:15
 Índice med. : 300

Ultrasom : 60 s
 Concentração : 126
 Diâmetro a 10% : 17.69 mu
 Diâmetro a 50% : 98.17 mu
 Diâmetro a 90% : 276.73 mu
 Diâmetro médio : 125.61 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : 2.41 g/cm³ / 1.30
 Superfície específica : 1574.83 cm²/g
 Diluição automática : Sim / Não
 Medida./Limp. : 60/60/8
 SOP : UFRGS L

Valores cumulativos particulares

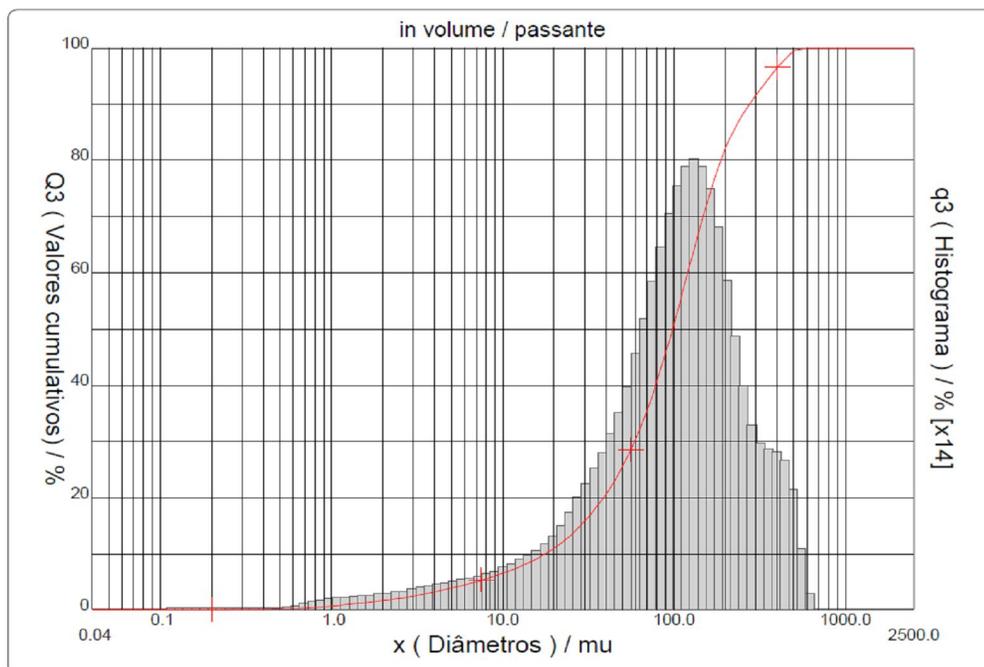
in volume / passante

x	0.10	1.00	10.00	100.0	1000.0
Q3	0.00	0.72	6.54	50.87	100.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	600.00



ANEXO D – Relatório da análise granulométrica da cinza com 16h de moagem



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 16h
 Tipo de produto : Pó
 Cliente : LdTM
 Comentários :
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante :
 Operador : Malu
 Empresa : UFRGS - LACER
 Localização : Porto Alegre - RS
 Data : 01/02/2013 Hora : 11:21:04
 Índice med. : 302

Ultrasom : 60 s
 Concentração : 127
 Diâmetro a 10% : 11.16 mu
 Diâmetro a 50% : 71.07 mu
 Diâmetro a 90% : 139.16 mu
 Diâmetro médio : 73.88 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : 2.41 g/cm³ / 1.30
 Superfície específica : 2050.83 cm²/g
 Diluição automática : Sim / Não
 Medida./Limp. : 60/60/8
 SOP : UFRGS L

Valores cumulativos particulares

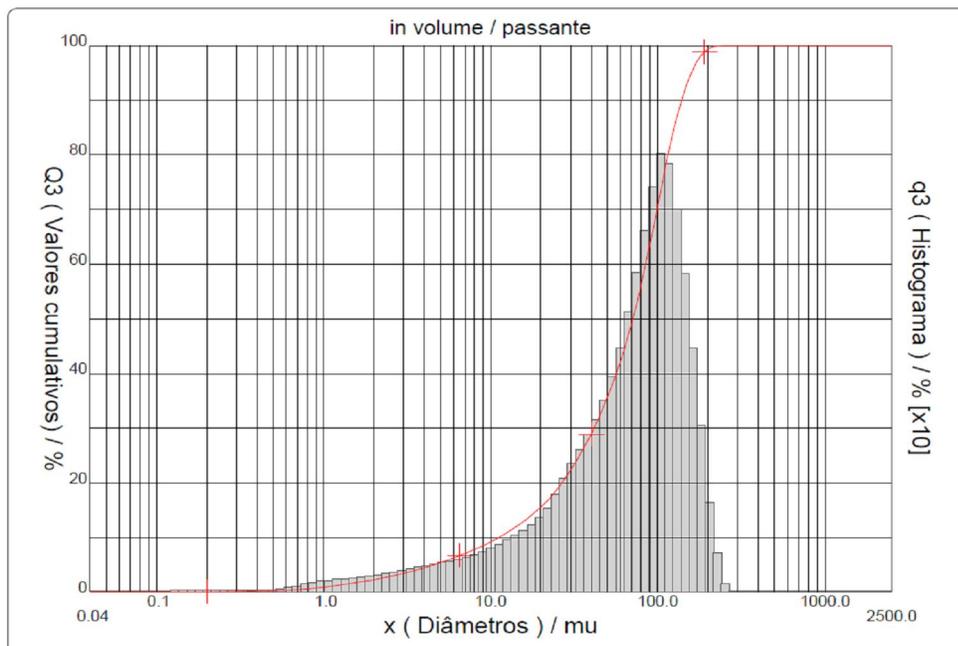
in volume / passante

x	0.10	1.00	10.00	100.0	1000.0
Q3	0.00	0.93	9.21	70.60	100.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	242.00



ANEXO E – Relatório da análise granulométrica da cinza com 32h de moagem



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 32h
 Tipo de produto : Pó
 Cliente : LdTM
 Comentários :
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante :
 Operador : Malu
 Empresa : UFRGS - LACER
 Localização : Porto Alegre - RS
 Data : 04/02/2013 Hora : 14:47:16
 Índice med. : 304

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 128
 Diâmetro a 10% : 7.62 mu
 Diâmetro a 50% : 56.69 mu
 Diâmetro a 90% : 107.29 mu
 Diâmetro médio : 57.61 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : 2.41 g/cm³ / 1.30
 Superfície específica : 7756.15 cm²/g
 Diluição automática : Sim / Não
 Medida./Limp. : 60/60/8
 SOP : UFRGS L

Valores cumulativos particulares

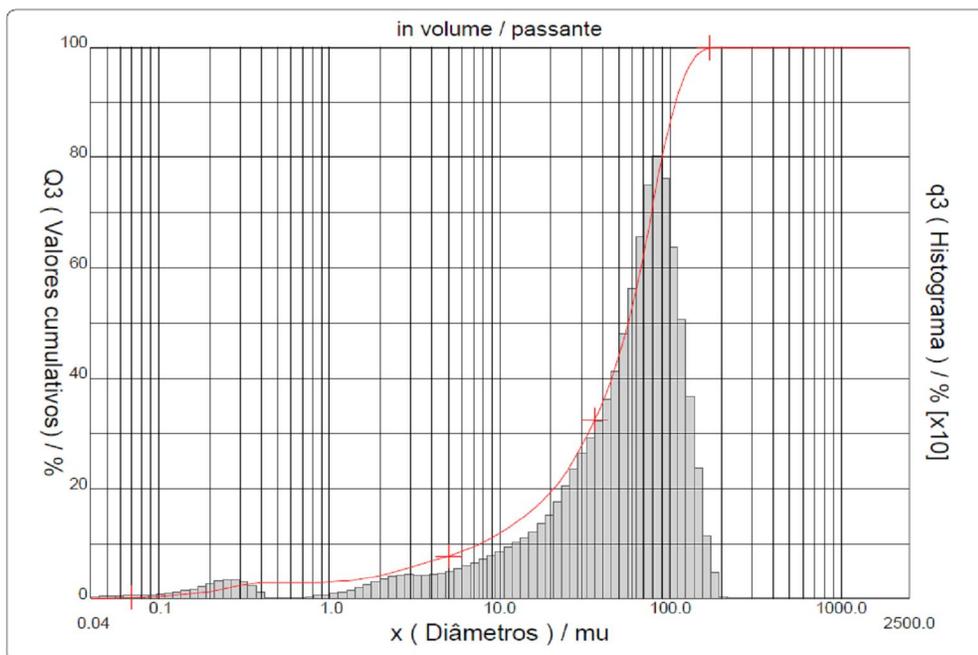
in volume / passante

x	0.10	1.00	10.00	100.0	1000.0
Q3	0.43	3.11	11.93	86.55	100.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	180.00



ANEXO F – Relatório da análise granulométrica da cinza com 64h de moagem



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA



CILAS 990 Líquido

Faixa : 0.20 μm - 500.00 μm / 70 Classes

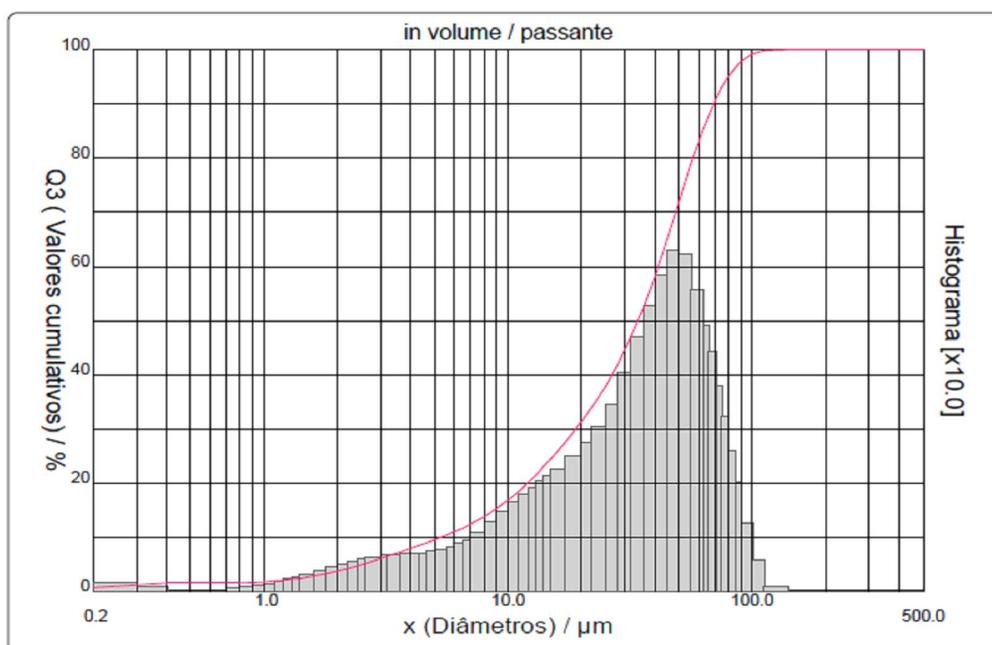
Ref da amostra	: 253/0514	Ultrasom	: 60	s (+durante)
Cliente	: UNESC	Obscuration	: 15 %	
Tipo da Amostra	: Amostra	Diâmetro a 10%	: 5.24	μm
Comentários	: Cinza 64 de moagem	Diâmetro a 50%	: 33.95	μm
Líquido	:	Diâmetro a 90%	: 69.46	μm
Agente dispersante	: Surfactante	Diâmetro médio	: 36.54	μm
Operador	: Giorgines	Fraunhofer	:	
Empresa	: COLORMINAS S.A.	Densidade/Fator	: -----	
Localização	: IÇARA - SC	Superfície específica	: -----	
Data : 16/05/2014	Hora : 11:23:39	Diluição automática	: Sim / Não	
Índice med.	: 8008	Medida./Limp.	: 60s/60s/4	
Database name	: CilasDB1	SOP name	: Colorminas	

Valores cumulativos particulares						in volume / passante				
x	1.00	2.50	5.00	8.00	10.00	20.00	25.00	37.00	44.00	53.00
Q3	1.88	4.92	9.53	13.77	16.84	31.29	37.75	53.76	63.30	74.81
x	63.00	74.00	88.00	105.0	125.0	149.0				
Q3	84.66	91.83	96.93	99.30	99.94	100.00				

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	140.00



Login : User Name = Giorgines Luz, Level = Controlador

APÊNDICES

APÊNDICE A – Dados das amostras de cinza com 2h de moagem.

Amostras	MASSA (g)	ALTURA (mm)	VOLUME (cm³)	DENSIDADE (g/cm³)	PRESSÃO (MPa)
0	3,050	13,65	1,921409	1,59	0
1	2,993	12,62	1,644880	1,82	100
2	2,999	12,34	1,581072	1,90	200
3	2,995	12,30	1,572027	1,90	300
4	2,809	11,90	1,477005	1,90	400
5	2,964	11,83	1,464076	2,02	500

APÊNDICE B – Dados das amostras de cinza com 4h de moagem.

Amostras	MASSA (g)	ALTURA (mm)	VOLUME (cm³)	DENSIDADE (g/cm³)	PRESSÃO (MPa)
0	5,261	52,17	6,924644	0,75	0
1	2,981	13,88	1,913864	1,55	100
2	3,030	13,02	1,787161	1,69	200
3	3,010	12,63	1,749401	1,72	300
4	2,878	12,34	1,698952	1,69	400
5	2,836	11,92	1,648572	1,72	500

APÊNDICE C – Dados das amostras de cinza com 8h de moagem.

Amostras	MASSA (g)	ALTURA (mm)	VOLUME (cm³)	DENSIDADE (g/cm³)	PRESSÃO (MPa)
0	4,504	52,17	6,924644	0,65	0
1	3,003	13,65	1,884992	1,59	100
2	3,012	12,18	1,671861	1,80	200
3	3,030	12,07	1,664290	1,82	300
4	3,004	11,73	1,614968	1,86	400
5	3,017	11,58	1,599136	1,88	500

APÊNDICE D – Dados das amostras de cinza com 16h de moagem.

Amostras	MASSA (g)	ALTURA (mm)	VOLUME (cm³)	DENSIDADE (g/cm³)	PRESSÃO (MPa)
0	4,926	52,17	6,924644	0,71	0
1	3,041	13,84	1,865385	1,63	100
2	3,037	12,71	1,726183	1,72	200
3	3,007	12,20	1,682215	1,68	300
4	3,038	11,91	1,622457	1,62	400
5	3,042	11,91	1,621231	1,62	500
6	2,997	11,62	1,602241	1,60	600

APÊNDICE E – Dados das amostras de cinza com 32h de moagem.

Amostras	MASSA (g)	ALTURA (mm)	VOLUME (cm³)	DENSIDADE (g/cm³)	PRESSÃO (MPa)
0	5,01	52,17	6,924644	0,72	0
1	3,13	14,03	1,885224	1,66	100
2	3,052	12,34	1,686144	1,81	200
3	3,097	12,39	1,718744	1,80	300
4	3,083	12,00	1,659636	1,85	400
5	2,985	11,59	1,598104	1,86	500
6	2,987	11,55	1,599809	1,86	600

APÊNDICE F – Dados das amostras de cinza com 64h de moagem.

Amostras	MASSA (g)	ALTURA (mm)	VOLUME (cm³)	DENSIDADE (g/cm³)	PRESSÃO (MPa)
0	4,920	52,17	6,924644	0,71	0
1	3,022	13,21	1,795423	1,68	100
2	2,982	12,46	1,609533	1,85	200
3	2,938	12,05	1,505351	1,95	300
4	2,971	12,10	1,517870	1,96	400
5	3,048	12,17	1,537809	1,98	500
6	3,000	11,66	1,415893	2,12	600