

# INFLUÊNCIA DO TEMPO DE MOAGEM NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA CINZA PESADA DE CARVÃO DE TERMOELÉTRICA<sup>1</sup>

Vinícius Martins<sup>2</sup>  
Tatiani Malgarise Brolesi Ciseski<sup>3</sup>  
Luana de Lucca de Costa<sup>4</sup>  
Lírio Schaeffer<sup>5</sup>

## Resumo

A combustão do carvão mineral resulta em dois tipos de resíduos sólidos: cinzas leves e pesadas (óxidos). A cinza pesada é um material granular, poroso, com distribuição granulométrica predominantemente de areia, composta principalmente por sílica e alumina. A deposição destes resíduos em bacias de sedimentação causa sérios problemas ao meio ambiente. O presente trabalho teve como objetivo principal a aplicação da técnica de moagem de alta energia visando à diminuição da granulometria da cinza pesada e com isso estudar suas propriedades físicas no processo de metalurgia do pó convencional. A evolução da estrutura durante a síntese e o efeito da variação do tempo de moagem foi caracterizada utilizando-se microscopia eletrônica de varredura (MEV) e o tamanho médio de partícula foram obtidos utilizando-se granulometria por difração de laser. A fim de observar a influência do tempo de moagem sobre a microestrutura dos pós de cinza pesada, foi realizada para tempos de moagem de, 2 h, 4 h, 8 h, 16 h e 32 horas. Com o decorrer do tempo de moagem ocorreu à diminuição do tamanho de partículas.

**Palavras-chave:** Cinzas de combustão de carvão; Moagem de alta energia; Metalurgia do pó convencional.

## INFLUENCE OF MILLING TIME IN THE PHYSICAL PROPERTIES BOTTOM ASH FROM COAL COMBUSTION BY THERMOELECTRIC

### Abstract

The combustion of coal results in two types of solid waste: fly and bottom ash (oxides). The bottom ash is a granular material, porous, with granulometric distribution predominantly sand, composed mainly of silica and alumina. The deposition of these residues in sedimentation basins causes serious problems to the environment. This study aimed to applying the technique of high energy milling, aiming to reduce the ash particle size and thereby study their physical properties in the process of conventional powder metallurgy. The evolution of the structure during the synthesis and effect of varying the milling time was characterized using scanning electron microscopy (SEM) and mean particle size were obtained using laser diffraction particle size. In order to observe the influence of milling time on the microstructure of bottom ash was held for milling times of 2 h, 4 h, 8 h, 16 h and 32 hours. In the course of the milling time was decreased particle size.

**Key words:** Bottom ash from coal combustion; Milling high energy; Conventional powder metallurgy.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Tecnólogo em fabricação mecânica. Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM), Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, e Professor do Instituto Federal Sul Rio-Grandense (IFSul), Campus Sapucaia do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. [viniciushiper@yahoo.com.br](mailto:viniciushiper@yahoo.com.br).

<sup>3</sup> Engenheira ambiental. Mestranda do PPGEM, Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; [tati.brolesi@ibest.com.br](mailto:tati.brolesi@ibest.com.br).

<sup>4</sup> Engenheira mecânica. Mestranda do PPGEM, Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; [luana.lucca@ufrgs.br](mailto:luana.lucca@ufrgs.br).

<sup>5</sup> Engenheiro mecânico. Prof. Dr.-Ing., Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; [schaefer@ufrgs.br](mailto:schaefer@ufrgs.br).

## 1 INTRODUÇÃO

A combustão do carvão mineral é uma importante fonte de energia, entretanto essa combustão gera uma grande quantidade de cinzas, que podem ser classificadas em dois tipos de resíduos sólidos: cinzas mosca e pesada.<sup>(1)</sup> Atualmente no Brasil são gerados cerca de 3 milhões de toneladas de cinzas por ano, sendo que 80% de resíduos são cinza mosca (também chamada de leve, com diâmetro médio de partícula em torno de 50  $\mu\text{m}$ ) e 20% de cinza pesada. Desse total as usinas termelétricas são responsáveis por 90% da produção enquanto o restante é produzido por empresas de pequeno porte.<sup>(2,3)</sup>

A disposição das cinzas a céu aberto exige grandes áreas para a construção das bacias de sedimentação que, por sua vez, têm capacidade limitada. Além disso, o resíduo fica exposto a processos de lixiviação de metais pesados presentes nas cinzas, podendo contaminar o solo e o lençol freático da região. Outro problema desse método de descarte é a poeira, resultante da ação do vento sobre a superfície das bacias, que atinge a população residente próximo a essas instalações.<sup>(4)</sup>

A metalurgia do pó é, às vezes, uma rota alternativa na produção de produtos e, outras vezes, a única alternativa de produção, como é o caso do compósito metal duro.<sup>(5)</sup>

Uma condição para o material compósito mostrar melhor desempenho é a distribuição homogênea das fases. A aglomeração de partículas prejudica as propriedades mecânicas do compósito. Diferenças no tamanho, concentração e morfologia das partículas, contribuem para a aglomeração. Na metalurgia do pó, a mistura é um item importante para uma distribuição homogênea das partículas em todo o material.<sup>(6)</sup>

O processo de Moagem de Alta Energia (MAE) é uma síntese mecano-química em que as misturas de pós de diferentes metais ou ligas são moídas conjuntamente para obtenção de uma liga homogênea, através da transferência de massa. Durante o processo, as partículas de pó são continuamente deformadas, soldadas a frio, quebradas e re-soldadas. A técnica consiste basicamente no processamento de materiais na forma de pós, juntamente com corpos de moagem, que podem ser esferas de aço ou outro material de alta dureza, inseridos em um vaso de moagem, geralmente feito do mesmo material das esferas.<sup>(6)</sup> O processo de moagem de alta energia é baseado nas seguintes etapas que ocorrem no estado sólido, conforme Figura 1.<sup>(7)</sup>

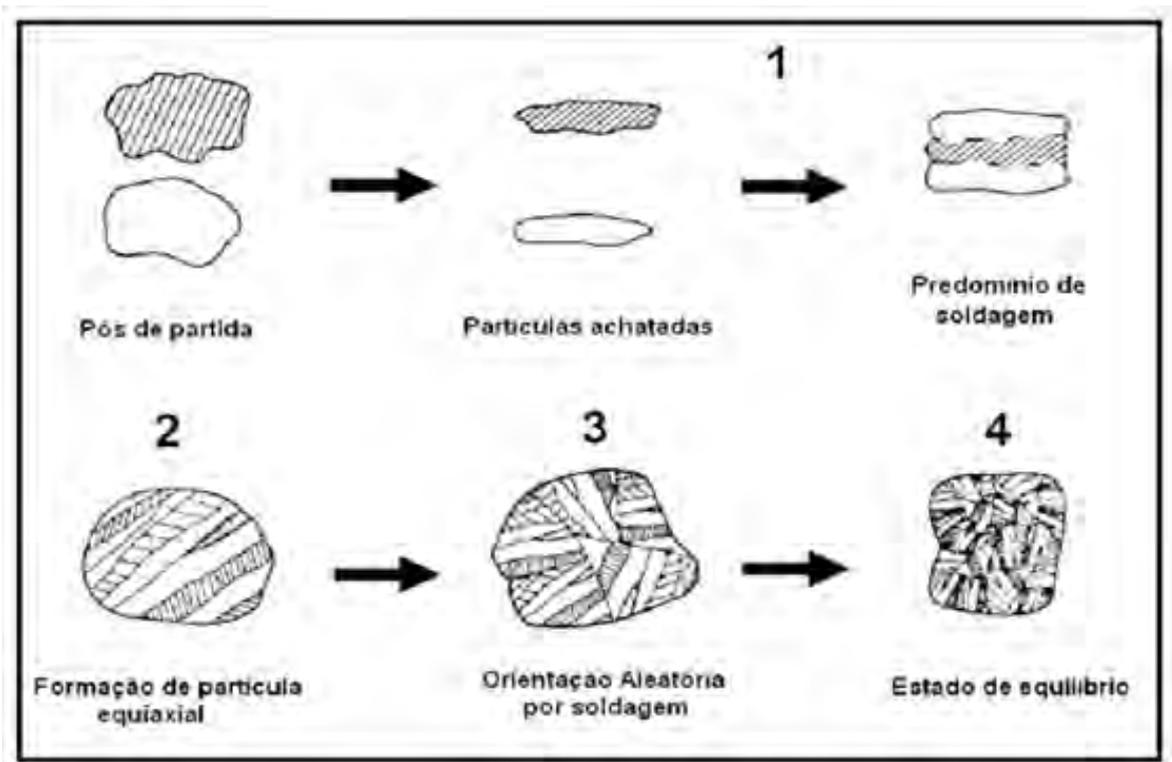


Figura 1. Evolução da microestrutura dos pós no processamento por moagem.<sup>(7)</sup>

A Figura 1 mostra os estágios do processo de moagem os quais estão descritos com Estágio 1, que durante a colisão das esferas, as partículas que estão retidas entre as duas superfícies, ficam esmagadas, como se as duas superfícies fossem "microforjas". Partículas achatadas com o formato de flocos podem ser então formadas. No 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. O Estágio 3 exibe a 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. No 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.<sup>(7)</sup>

Para se decidir sobre o tempo de moagem é necessário avaliar todos estes parâmetros e os compostos que serão combinados. O aumento do tempo de moagem, dependendo da atmosfera, aumenta o nível de contaminação desta amostra. Além disso, deseja-se sempre que a moagem dure apenas o tempo necessário para a formação da fase desejada.<sup>(8)</sup>

O moinho atritor consiste de um tambor vertical contendo impulsores que movimentam esferas no seu interior. As esferas em movimento juntamente com o pó inserido no moinho chocam-se entre si, com a parede do tambor e também com as aletas.<sup>(9,10)</sup>

O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos da moagem de alta energia visando à diminuição da granulometria da cinza pesada e com isso estudar suas propriedades físicas no processo de metalurgia do pó convencional. Para caracterização dos pós

produzidos foram realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e granulometria a laser.

## 2 MATERIAS E MÉTODOS

Decidiu-se a escolha da cinza pesada na fabricação do compósito Cinza-20%Fe por este ser um material abundante e ainda sem destino correto. O Ferro servirá de aglomerante devido a seu baixo preço. O procedimento experimental relativo à fabricação do compósito em estudo tem como base as técnicas convencionais da metalurgia do pó associada à técnica de moagem de alta energia. As matérias primas utilizadas foram cinza pesada da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, coletada dia 17 de Novembro de 2011 e pó de Ferro da empresa Hoeganaes.

Para determinação do tamanho de partícula as amostras foram analisadas no microscópico eletrônico de varredura (MEV) do centro de microscopia da UFRGS, de marca JEOL modelo 5800 com EDS acoplada.

A moagem da cinza pesada foi realizada em moinho de bolas, onde foram pesados 2 kg de cinza em balança analítica, colocado no recipiente de moagem e completado até 80% do seu volume com álcool etílico. Este último desempenha papel de agente controlador do processo. O recipiente 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 cinza foram colocados 400 g de esferas.

Os tempos de moagem foram de 2, 4, 8, 16 e 32 horas, sendo retiradas amostras dos pós obtidos a cada tempo determinado para caracterização. Os pós processados em cada tempo de moagem foram retirados do recipiente ainda misturado com álcool etílico e colocados em bandejas. Essas foram 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.

Definiu-se a pressão de compactação através da curva de compressibilidade, traçada com base na norma ASTM B331.<sup>(11)</sup> Essa norma define que a compressibilidade é 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, nos quais resultaram diferentes densidades.

Foram medidas as massas dos corpos de provas compactados em uma balança de precisão e mensurados através de um micrometro, os diâmetros e alturas para calcular-se o volume para determinar a densidade.

A técnica de avaliação do tamanho de partículas por difração de laser é um método pelo qual as partículas são dispersas num fluído (neste caso água) em movimento causando descontinuidades no fluxo do fluído, 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 softwares matemáticos.<sup>(12)</sup>

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A cinza pesada de carvão serviu como matéria prima, através da micrografia juntamente com a granulometria a laser realizada é possível avaliar a evolução da morfologia das partículas ao longo das 32 horas de moagem. Durante o processo de MAE, 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 2 apresenta a cinza com 2 horas de moagem com partículas próximas a 80 a 200  $\mu\text{m}$ .

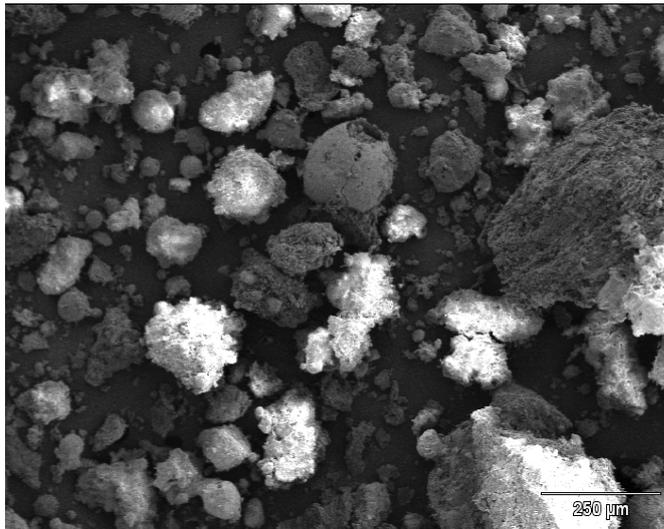


Figura 2. Micrografia da cinza com 2h de moagem.

A granulometria a laser das amostras com 2 horas de moagem, que estão apresentadas na Figura 3, que relaciona o valor cumulativo em relação ao diâmetro médio das partículas. A granulometria a laser identificou a Densidade/ Fator: 2.41 g/cm<sup>3</sup> / 1.30

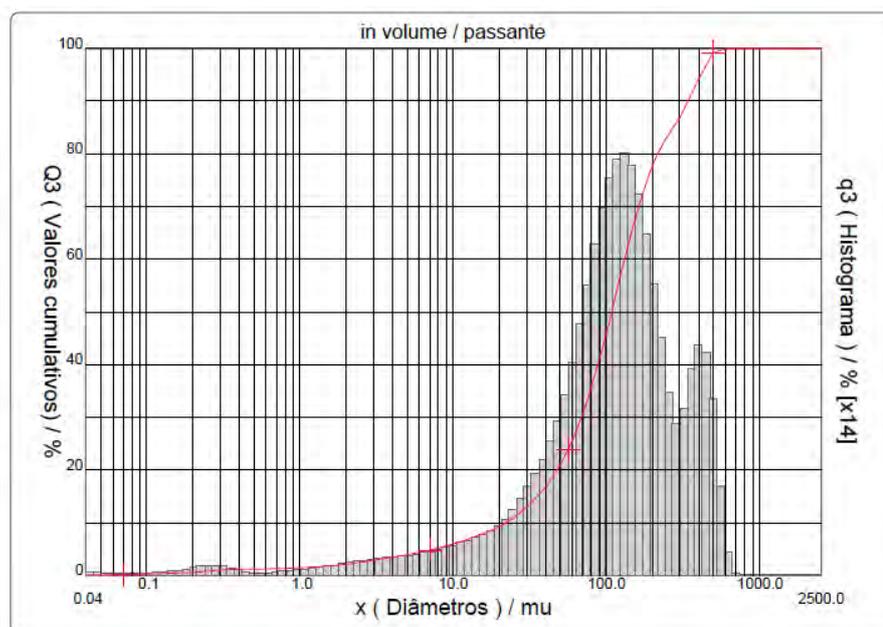


Figura 3. Distribuição granulométrica da cinza com 2h de moagem.

A granulometria informada pelo o valor do diâmetro médio é de 142.72  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  como mostra a Figura 4.

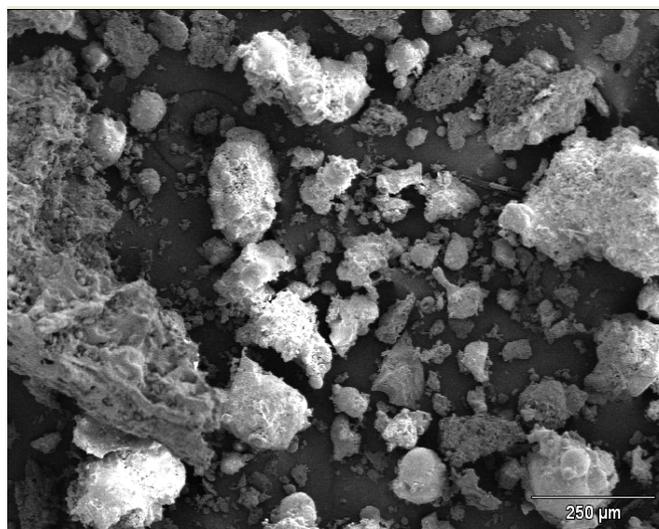


Figura 4. Micrografia da cinza com 4h de moagem.

Observa-se pouca diferença nas micrografias entre as Figuras 2 e 4 sendo este resultado confirmado com a granulometria a laser exibido pela Figura 5.

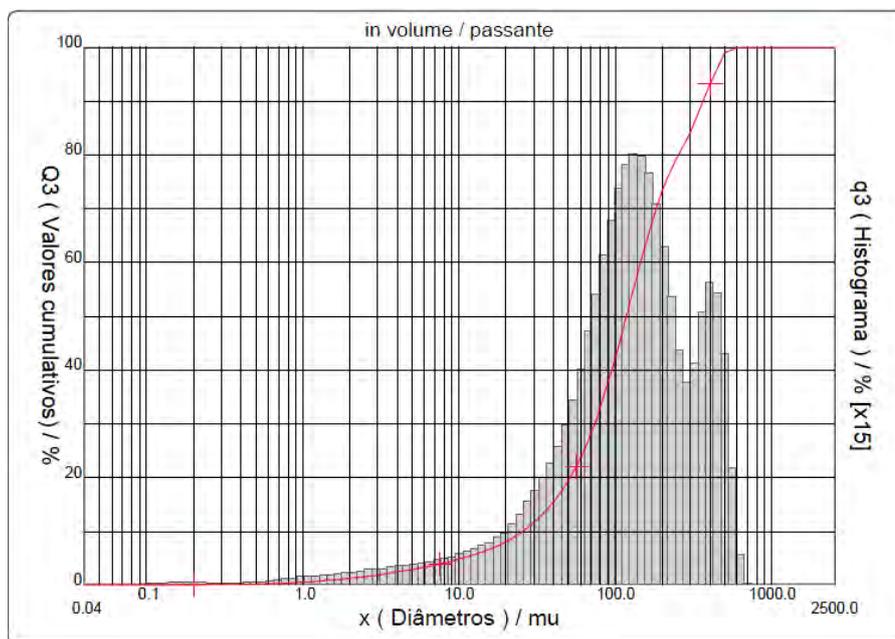
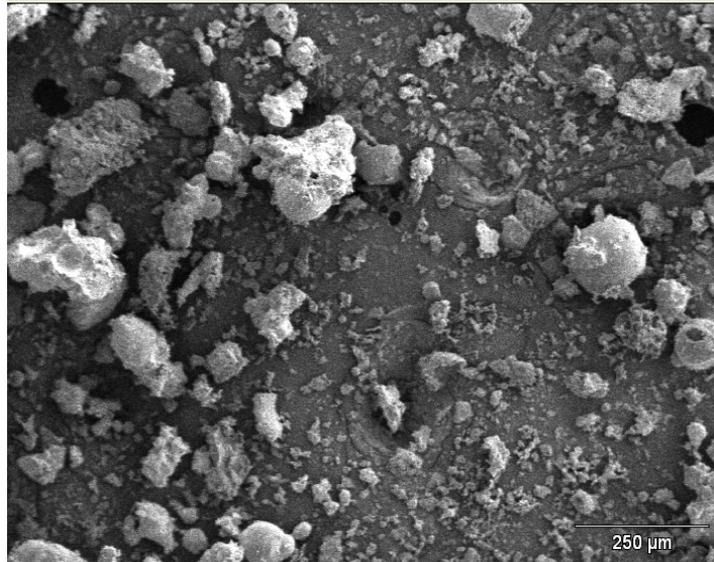


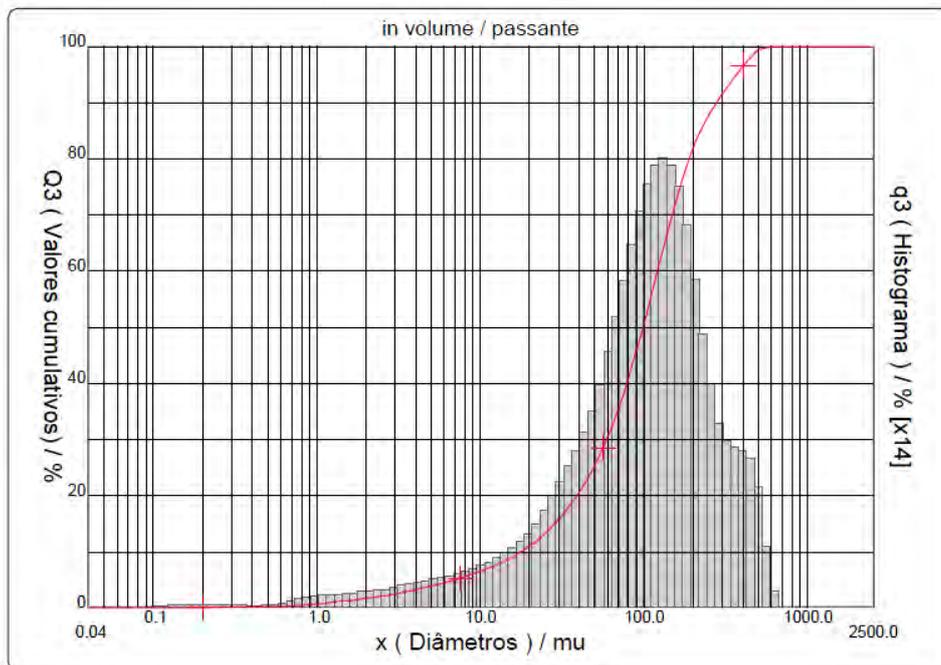
Figura 5. Distribuição granulométrica da cinza com 4h de moagem.

A distribuição continua bimodal com o diâmetro médio de 155,43  $\mu\text{m}$  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 6 apresenta partículas próximas à faixa de 50 a 200  $\mu\text{m}$  analisada visualmente.



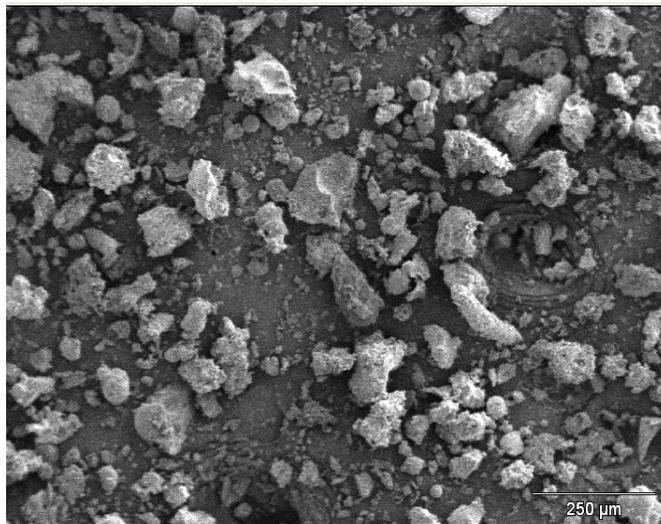
**Figura 6.** Micrografia da cinza com 8h de moagem.

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 6 demonstra partículas enormes dentro da faixa de 30 a 180 µm com diâmetro médio de 125,61 µm. A Figura 7 exhibe a distribuição modal.



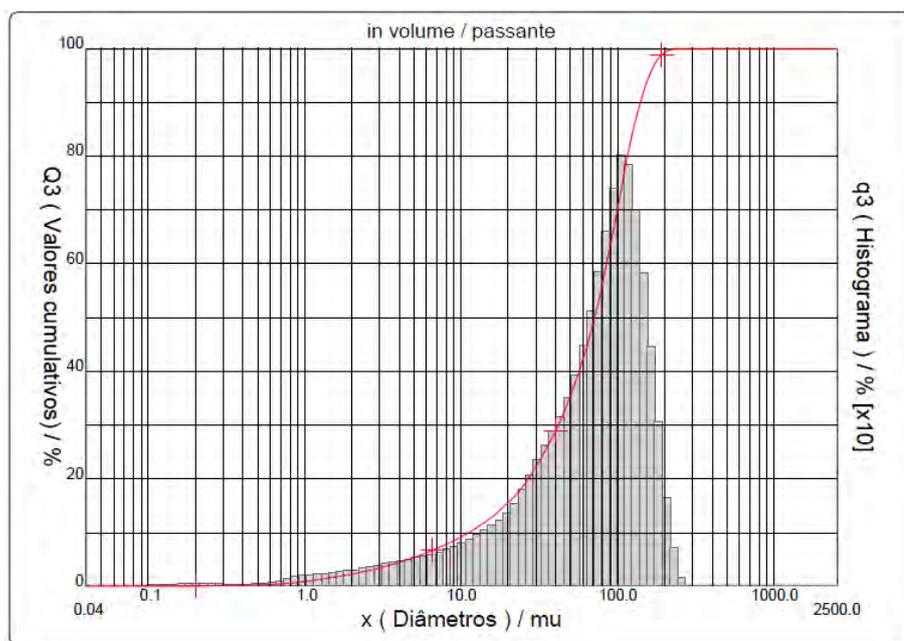
**Figura 7.** Distribuição granulométrica da cinza com 8h de moagem.

O aumento da resistência à fratura e maior coesão entre as partículas, com a diminuição do tamanho de partículas, causam aglomeração. A Figura 7 mostra partículas próximas a 30 µm enquanto a Figura 8 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 8 apresenta a micrografia da cinza pesada com 16 horas de moagem e a visível diminuição da partícula.



**Figura 8.** Micrografia da cinza com 16h de moagem.

A Figura 8 apresenta um tamanho visual entre 30 e 150  $\mu\text{m}$  que pode ser identificado na Figura 9 uma modificação no formato do histograma na distribuição granulométrica.



**Figura 9.** Distribuição granulométrica da cinza com 16h de moagem.

Observa-se na Figura 9 que a o tamanho da partículas maiores ficou maior que 200  $\mu\text{m}$ , mas não é significativo. Os dados de partícula neste estágio de moagem começa a ficar mais importante devido à granulometria deste pó ficar dentro da faixa normal da metalurgia do pó convencional. Isto é, o pó de cinza pesada com granulometria passível até de comercialização desde que sua aplicação seja de extrema importância para um processo ou produto obtido por metalurgia do pó.

A Figura 10 exhibe a micrografia do pó de cinza pesada com 32 horas de moagem em um moinho de alta energia. Esta figura demonstra claramente a cominuição das partículas de pó que atingiram faixa de tamanho entre 20 e 130  $\mu\text{m}$  numa homogeneidade distribuída em toda a imagem.

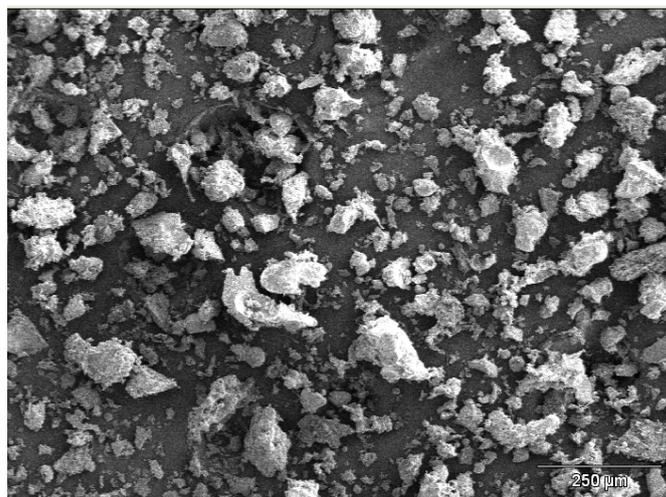


Figura 10. Micrografia da cinza com 32h de moagem.

A Figura 11 mostra que a granulometria apresentada após 32 horas de moagem está totalmente dentro da faixa da metalurgia do pó convencional com um tamanho médio de 57.61 µm.

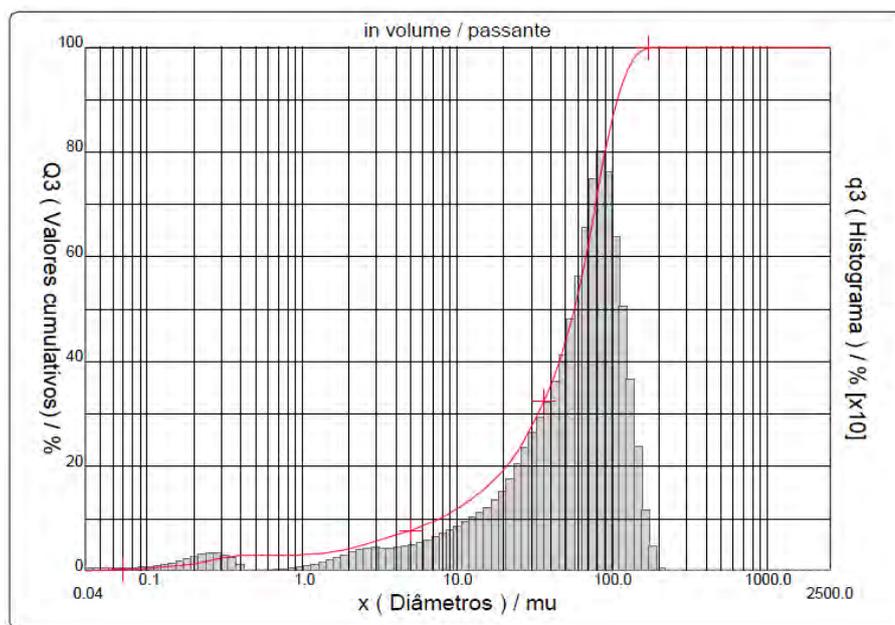


Figura 11. Distribuição granulométrica da cinza com 32h de moagem.

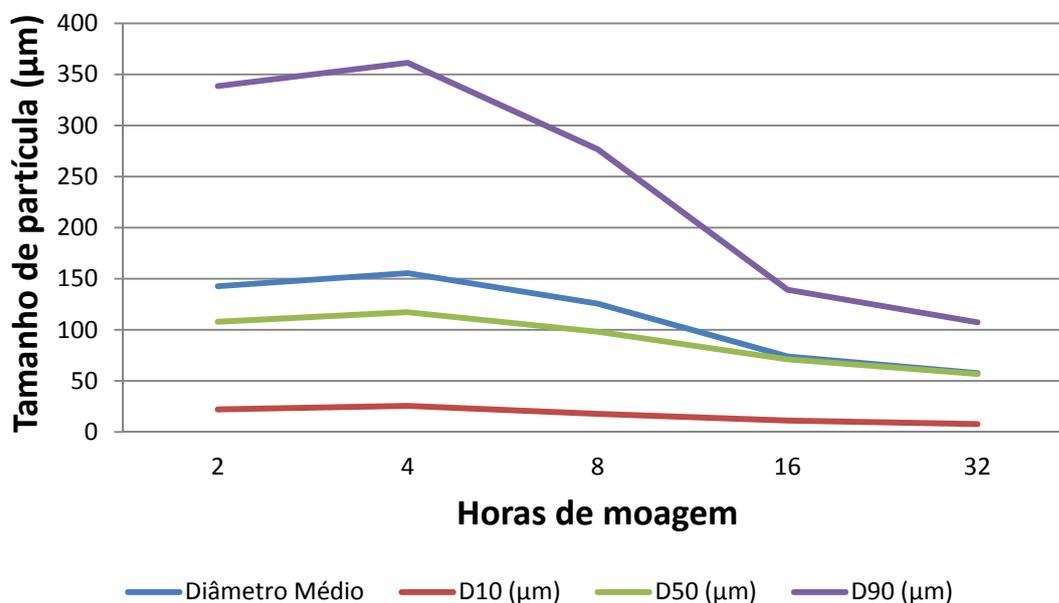
Baseado na granulometria encontrada em cada ensaio construiu-se a Tabela 1 para quantificar os valores encontrados.

Tabela 1. Resultados da granulometria por difração de laser da cinza pesada moída

Horas de moagem	Diâmetro médio (µm)	D <sub>10</sub> (µm)	D <sub>50</sub> (µm)	D <sub>90</sub> (µm)	Superfície específica (cm <sup>2</sup> /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

A partir dos resultados da Tabela 1 plotou-se o gráfico para visualizar a influencia do tempo de moagem sobre o tamanho de partícula como mostra a Figura 12.

### Tempo de moagem X Tamanho de partícula



**Figura 12.** Influencia do tempo de moagem no tamanho de partícula.

Observa-se que o pó com 4 horas de moagem houve um aumento do tamanho da partícula mostrando possível soldagem dos constituintes dúcteis da cinza. Com compósito pronto de Cinza-20Fe determinou-se a densidade média aparente do material nos tempos de moagem 2h, 4h, 8h, 16h e 32h, obtendo os valores em  $\text{g/cm}^3$ , como mostra a Tabela 2.

**Tabela 2.** Densidade Aparente das composições de cinza

Composição da Cinza	Densidade Aparente ( $\text{g/cm}^3$ )
Cinza 4h + 20% Fe	0,76
Cinza 8h + 20% Fe	0,65
Cinza 16h + 20% Fe	0,71
Cinza 32h + 20% Fe	0,72

A curva de compressibilidade apresenta a variação da densidade à verde em função da pressão de compactação, sendo o primeiro ponto da curva a densidade aparente. A Figura 13 mostra o efeito da pressão de compactação na densidade relativa das amostras. Todas as amostras apresentaram aumento da densidade relativa com o aumento da pressão. A densidade relativa alcançou um valor máximo de  $1,88 \text{ g/cm}^3$  para a amostra de 8 horas de moagem.

O pó moído por 4 horas pode estar com granulometria mais variada, onde os grãos menores preenchem espaços vazios deixados pelos maiores.

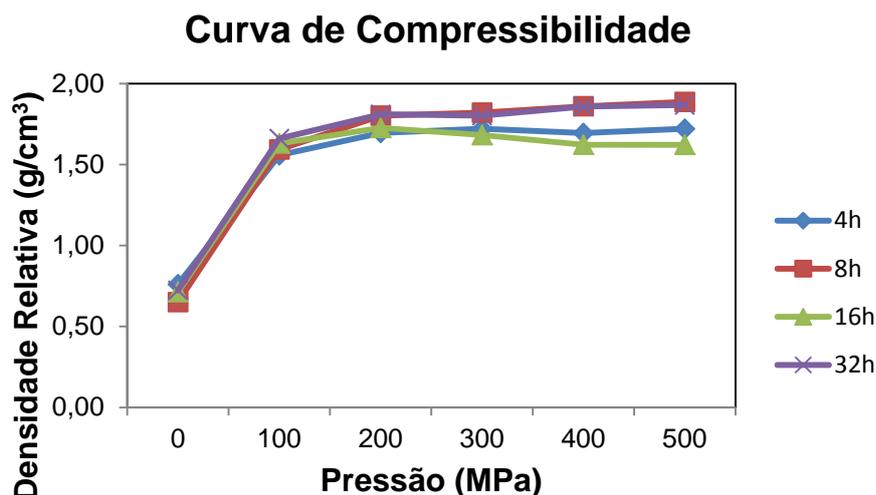


Figura 13. Curva de Compressibilidade das misturas Cinza-20Fe.

Determinou-se a densidade à verde dos compósitos cinza-20Fe, nos tempos de moagem: 2h, 4h, 8h, 16h e 32h obtendo os valores em  $\text{g/cm}^3$ . A Tabela 3 apresenta os dados para a composição do material e para o cálculo da densidade aparente da cinza com 4h de moagem que foi de aproximadamente  $1,69 \text{ g/cm}^3$  com a pressão de 200 MPa. A amostra acima de 500 MPa rompeu.

Tabela 3. Dados das amostras de cinza com 4h de moagem

Amostras	MASSA (g)	ALTURA (mm)	VOLUME ( $\text{cm}^3$ )	DENSIDADE ( $\text{g/cm}^3$ )	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

Através da Tabela 4 é possível verificar os dados para o cálculo da densidade aparente da cinza com 8h de moagem que foi de aproximadamente  $1,88 \text{ g/cm}^3$ . A amostra acima de 500 MPa fraturou e a densidade a verde foi atingida de  $1,80 \text{ g/cm}^3$  com a pressão de 200 MPa.

Tabela 4. Dados das amostras de cinza com 8h de moagem

Amostras	MASSA (g)	ALTURA (mm)	VOLUME ( $\text{cm}^3$ )	DENSIDADE ( $\text{g/cm}^3$ )	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

Tendo como densidade a verde aproximadamente  $1,72 \text{ g/cm}^3$ , no qual se pode verificar através dos dados da cinza com 16h de moagem na Tabela 5. A amostra

acima de 600 MPa rompeu e a densidade a verde foi atingida com a pressão de 200MPa.

**Tabela 5.** Dados das amostras de cinza com 16h de moagem

Amostras	MASSA (g)	ALTURA (mm)	VOLUME (cm <sup>3</sup> )	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )	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

A Tabela 6 apresenta os dados para a composição do material e para o cálculo da densidade a verde da cinza com 32h de moagem que foi de aproximadamente 1,81 g/cm<sup>3</sup> com a pressão de 200 MPa. A amostra acima de 600 MPa fraturou.

**Tabela 6.** Dados das amostras de cinza com 32h de moagem

Amostras	MASSA (g)	ALTURA (mm)	VOLUME (cm <sup>3</sup> )	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )	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

#### 4 CONCLUSÕES

Tendo em vistas os dados apresentados, conclui-se que o pó com duas hora ficou com o tamanho médio da partícula de 142,72  $\mu\text{m}$  com uma distribuição bimodal. O pó com 4 horas de moagem houve um aumento do tamanho da partícula mostrando possível soldagem dos constituintes dúcteis da cinza e a distribuição continua bimodal com o diâmetro médio de 155,43  $\mu\text{m}$ . Esta soldagem aconteceu é pode ver visto no tamanho da partícula ou superfície específica (cm<sup>2</sup>/g) que obteve o valor de 1245,95, sendo o menor entre os outros resultados da superfície. A cinza com 8 horas de moagem demonstra partículas enormes dentro da faixa de 30 a 180  $\mu\text{m}$  com diâmetro médio de 125,61  $\mu\text{m}$ . As partículas com 16 horas de moagem apresentam diâmetro médio de 73,88 $\mu\text{m}$  com uma diminuição no tamanho de partículas se dá através do aumento no tempo de moagem sendo a visível diminuição da partícula na micrografia. A granulometria apresentada após 32 horas de moagem está totalmente dentro da faixa da metalurgia do pó convencional com um tamanho médio de 57.61  $\mu\text{m}$ . A densidade aparente das composições de cinza pesada e moída com ferro ficou em torno de 0,7 g/cm<sup>3</sup>. A densidade a verde da cinza com 4h foi de 1,69 g/cm<sup>3</sup> e de 8h foi de 1,80 g/cm<sup>3</sup> com a pressão de 200 MPa e rompimento nas amostras com 600 MPa.. A densidade a verde da cinza com 16h foi de 1,72 g/cm<sup>3</sup> e de 32h foi de 1,81 g/cm<sup>3</sup> com a pressão de 200 MPa e

rompimento nas amostras com 700 MPa. Observa-se que a densidade a verde da cinza pesada com 20% de ferro e moída em diversas horas é entre de 1,69 g/cm<sup>3</sup> a 1,81 g/cm<sup>3</sup>.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e a instituição de apoio financeiro CAPES.

## REFERÊNCIAS

- 1 HEINECK, S. H., BICA, A. V. D. CONSOLI, N. C., **Estudo da morfologia e condutividade hidráulica de mistura de cinza de carvão-bentonita**, *XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, São Paulo, 2002.
- 2 MENDES, B. A. O., CARNEIRO, M. C., PONTES, F. V. M. **Determinação de Elementos em Cinzas Volantes de Carvão Utilizando Digestão Assistida por Ultrassom e Quantificação por ICP-OES**, *XVII Jornada de Iniciação Científica – CETEM*, p. 248-254, 2009.
- 3 ROCHA, J. C.; M. CHERIAF; C. POZZOBON; M. S. MAIA; L. MAGRI, S. M. T. Xavier, **Reaproveitamento das Cinzas Pesadas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda na Elaboração de Materiais de Construção: Aspectos Tecnológicos e Ambientais**, *Décimo Quinto Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Foz do Iguaçu, Paraná, p. 1-5, 1999.
- 4 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.
- 5 GUTIÉRREZ, J.A.E., **Extração de ligantes e sinterização por plasma de metal duro**, Tese de D.Sc., UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2002.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 LUCIANO, A. **Síntese e caracterização de compostos obtidos por moagem de alta energia do sistema Fe-Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**. 2004, 144f. Dissertação de Mestrado (Física). Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2004.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 ASTM B331 - 10 **Standard Test Method for Compressibility of Metal Powders in Uniaxial Compaction** ASTM 2010.
- 12 PAPINI, C. J.; NETO, R. M. L. **Análise granulométrica de pós metálicos por difração de laser via seca**. 17<sup>o</sup> CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. Disponível em: <http://www.ipen.br/biblioteca/2006/cbecimat/12576.pdf>