



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPG3M

OBTENÇÃO DE CERMET POR TECNOLOGIA DO PÓ A PARTIR DA UTILIZAÇÃO
DA CINZA LEVE PROVENIENTE DA QUEIMA DO CARVÃO MINERAL EM
TERMOELÉTRICA

Andréia Brogni

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2013



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPG3M

OBTENÇÃO DE CERMET POR TECNOLOGIA DO PÓ A PARTIR DA UTILIZAÇÃO
DA CINZA LEVE PROVENIENTE DA QUEIMA DO CARVÃO MINERAL EM
TERMOELÉTRICA.

Andréia Brogni
Licenciada em Química

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 - PPG3M, como parte dos requisitos para a 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. Lírío Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Engº Adriano Michael Bernardin - UNESC

Prof. Dr. Engº Carlos Hoffmann Sampaio – PPGE3M

Prof. Dr. Engº José Carlos Krause de Verney - ULBRA

Coordenador do PPG3M:
Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Aos meus pais
João Valmor Brogni e
Iolanda da Silva Brogni

AGRADECIMENTO

A Deus, que sempre me fortalece.

Ao meu orientador e verdadeiro mestre Prof Dr. Ing. LÍRIO Schaeffer por tudo que aprendi.

Ao Vinícius Martins que além de me auxiliar e muito nesse projeto é um amigo de ouro que fiz durante meu mestrado.

Aos funcionários do Centro de tecnologia da UFRGS, demais colegas e professores do programa de pós-graduação e todos aqueles que de alguma forma contribuíram no esforço da conclusão deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

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.

Também agradeço a todos amigos de meu dia a dia e a todos que de forma direta ou indiretamente me auxiliaram de alguma forma.

À minha família, que é meu alicerce.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XII
RESUMO.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	16
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 Do carvão às cinzas.....	18
2.1.1 Resgate histórico da utilização do carvão.....	20
2.1.2 Obtenção das cinzas.....	22
2.1.3 Cinza pesada.....	23
2.1.4 Cinza Leve.....	27
2.2 Metalurgia do pó.....	28
2.2.1 História da metalurgia do pó.	29
2.2.2 Aplicação técnica da metalurgia do Pó.....	31
2.2.3 Matérias primas.....	33
2.2.4 Ferro.....	34
2.2.5 Fabricação de pós metálicos.....	35
2.2.6 Compactação.....	36
2.2.7 Sinterização.....	37
2.2.7.1 Sinterização por fase sólida.....	41
2.2.7.2 Sinterização por fase líquida.....	41
2.3 Cermets.....	42
2.3.1 História do cermet.....	43
2.3.2 Aplicações da usinagem.....	44
2.3.2.1 Aplicações da Cerâmica-metal.....	44
2.3.3 Propriedades mecânicas dos cermets.....	45
3. ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	47
3.1 Obtenção dos pós.....	48
3.2 Fluorescência de raio X.....	48

3.3	Análise de Carbono (C) da cinza leve.....	48
3.4	Distribuição granulométrica por cicloclassificador de partículas.....	49
3.5	Determinação do tamanho de partícula.....	50
3.6	Preparação da amostra.....	50
3.7	Densidade Aparente.....	51
3.8	Compactação dos pós.....	51
3.9	Densidade a Verde.....	52
3.10	Sinterização.....	53
3.11	Caracterizações das amostras sinterizadas.....	54
3.11.1	Densidade.....	54
3.11.2	Dureza e Microdureza.....	55
3.11.3	Microscopia ótica e eletrônica (MEV)	55
3.11.4	Análise via Detector de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)	55
4.	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	57
4.1	Caracterização da Cinza.....	57
4.1.1	Composição química por fluorescência de raio X.....	57
4.1.2	Granulometria por peneira e cicloclassificador.....	58
4.1.3	Micrografia da amostra de cinza leve e ferro puro.....	59
4.2	Compactação.....	61
4.3	Curva de Compressibilidade, Densidade e Sinterização.....	63
4.3.1	Cermet 20% de Fe + 80% de Cinza.....	63
4.3.2	Compósito a base de Fe.....	64
4.4	Durezas e Microdurezas das amostras sinterizadas.....	67
4.5	Análises metalográficas das amostras contendo 95% de ferro com 5% de cinza e contendo 90% de ferro com 10% de cinza.....	69
4.6	Análises Micrográfica do sinterizado.....	72
4.7	Ensaio de usinabilidade com a utilização do Cermet.....	74
5	CONCLUSÕES.....	78
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	80
	APÊNDICES.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Linhas de Pesquisas do Projeto de Cinzas do LdTM/UFRGS (Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul).....	17
Figura 2: Fluxograma da geração de cinzas no complexo termoeletrico a carvão mineral - Complexo Jorge Lacerda.....	19
Figura 3: Bacias de sedimentação de cinzas do Complexo Termoeletrico Jorge Lacerda.....	21
Figura 4: Faixa granulométrica das cinzas pesadas estudadas na Usina Jorge Lacerda.	26
Figura 5: Fluxograma simplificado da rota de metalurgia do pó.....	29
Figura 6: Corte vertical do equipamento no processo de sinterização.....	30
Figura 7: Escovas elétricas para aplicação em motores elétricos e alternadores.....	31
Figura 8: Peças de forma relativamente complexa e grande precisão dimensional.....	32
Figura 9: Peças magnéticas da empresa DORST.....	32
Figura 10: Moagem: realizada em moinhos de bola (esferas de metal de alta dureza)...	35
Figura 11: Pulverização de metal fundido que se solidifica formando o pó.....	35
Figura 12: Formação da geometria da peça em matrizes.....	36
Figura 13: Exemplo de compactação.....	37
Figura 14: Variação dimensional em secções da peça antes e depois da sinterização....	39
Figura 15: Fluxograma do trabalho desenvolvido.....	47
Figura 16: Determinador de Carbono.....	49
Figura 17: Granulômetro (Cicloclassificador CIMAQ).....	49
Figura 18: Microscópio eletrônico de varredura.....	50
Figura 19: Ferramental de compactação cilíndrica (vista geral).....	51
Figura 20: Desenho Técnico do Ferramental de compactação cilíndrica.....	52
Figura 21: Curva de sinterização do ferro puro e cinza leve.....	53
Figura 22: Forno de sinterização.....	54
Figura 23: Granulometria da cinza leve em peneiras e via úmido em Granulômetro (Cicloclassificador Cimaq).....	59
Figura 24: Micrografia do pó de cinza leve.....	60
Figura 25: Micrografia amostra de ferro puro.....	60
Figura 26: Diagrama Densidade X Pressão a verde das amostras de 5% e 10% de cinza compactadas.....	62

Figura 27: Curva de compressibilidade de 80% de cinza leve e 20% de ferro antes da sinterização.....	64
Figura 28: Densidade da amostra a verde e sinterizada contendo 95% de ferro e 5% de cinza em função da pressão de compactação.....	65
Figura 29: Densidade da amostra a verde e sinterizada contendo 90% de ferro e 10% de cinza em função da pressão de compactação.....	65
Figura 30: Densidade do cermet em função da pressão de compactação e de sinterização.....	66
Figura 31: Densidade das amostras sinterizadas.....	67
Figura 32: Variação na dureza Brinell (HB) em função da pressão de compactação depois de sinterizado a 1160°C.....	67
Figura 33: Microdureza das amostras (HV) em 300 MPa.....	69
Figura 34: Metalografia das amostras contendo (A) 5% de cinzas (100 MPa), (B) 10% de cinzas (100 MPa), (C) 5% de cinzas (800 MPa), (D) 10% de cinzas (800 MPa), 100X.....	70
Figura 35: Micrografia da amostra sinterizada contendo 5% de cinza (95X).....	70
Figura 36: Micrografia da amostra sinterizada contendo 5% de cinza (1500X).....	71
Figura 37: Espectro de EDS da região de difusão na borda das partículas de cinza.....	71
Figura 38: Micrografia do sinterizado a 1150°C com aumento de 50x.....	72
Figura 39: Metalografia do sinterizado a 1200°C com aumento de 50x.....	73
Figura 40: Metalografia do sinterizado a 1250°C com aumento de 50x.....	73
Figura 41: Metalografia do sinterizado a 1300°C com aumento de 50x.....	74
Figura 42: Torno Convencional Nardini Modelo Nodus 250.....	75
Figura 43: Corpos de prova da Ferramenta de Cermet (Cinza + 20 % Fe) antes da usinagem.....	76
Figura 44: Porta Ferramenta.....	76
Figura 45: Execução do ensaio de usinagem.....	76
Figura 46: Ferramentas de cermet quebradas após o ensaio de usinabilidade.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química de cinzas pesadas americanas.....	23
Tabela 2: Composição química de cinzas pesadas provenientes da Usina Jorge Lacerda	24
Tabela 3: Corrosividade das cinzas pesadas do estado americano de Indiana.....	25
Tabela 4: Composição e características da cinza leve.....	28
Tabela 5: Temperaturas, tempos e atmosfera de sinterização.....	40
Tabela 6: Análise química em espectrômetro por fluorescência de raios X.....	57
Tabela 7: Valores de densidade a verde – 5% de cinza.....	61
Tabela 8: Valores de densidade a verde – 10% de cinza.....	62
Tabela 09: Resultados da microdureza das amostras sinterizadas	68
Tabela 10: Velocidade de corte e avanço da ferramenta em relação ao alumínio.....	75

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Altura
pH	Potencial Hidrogeniônico
ppm	Partes por milhão
Ø	Diâmetro

LISTA DE ABREVIATURAS

EDS	Detector de Energia Dispersiva de Raios-X
EUA	Estados Unidos da América
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Este trabalho busca produzir cermet (Cinza-Fe) pela tecnologia do pó utilizando cinza leve produzida com a queima do carvão mineral em termoelétrica para uma possível utilização e aplicação na usinagem. Esse estudo tem como objetivo específico caracterizar e analisar as propriedades mecânicas e metalúrgicas das amostras obtidas a partir das misturas. Utilizou-se o ferro como componente da mistura em função do baixo custo e vasta disponibilidade. Após a obtenção da cinza leve, determinou-se o tamanho da partícula da cinza leve por peneiras e cicloclassificador. Analisou-se a composição química da amostra através de espectrômetro por fluorescência de raios X. Também foi realizada a análise por MEV dos pós de cinza leve e ferro puro. Preparou-se as misturas com Ferro + 5% Cinza e Ferro + 10% de Cinza para estudo da interação entre os constituintes. Misturou-se também Cinza + 5% de Ferro e Cinza + 10% de Ferro, mas ambas misturas quebraram. Então se misturou Cinza + 20% de Ferro, que tal composição constitui o cermet produzido. Realizou-se a compactação do cermet (Cinza + 20% de Ferro) produzido em pressões de 100 a 400 MPa e para as amostras de Ferro + 5% e Ferro + 10% de cinza as pressões de compactação foram de 100 a 800 MPa. Determinou-se as densidades aparente e a verde de todas as composições e realizou-se a sinterização das mesmas amostras em temperaturas que variaram entre 1150 °C a 1300 °C. Foram feitas a densidade dos sinterizados e realizou-se análise de dureza, microdureza, metalografia, MEV e EDS. Após todos os ensaios, definiu-se o projeto e foi executada a fabricação da ferramenta para a usinagem com o cermet Cinza + 20% Ferro e foi realizado o ensaio de usinabilidade. Na mistura de cinza com 20% de ferro foi observado que o aumento da temperatura de sinterização diminui a densidade da mistura, mas aumenta a dureza indicando a difusão da matriz cerâmica no ferro. Os resultados mostraram que é possível a obtenção de cermets a partir da cinza leve e ainda comprovou um potencial para aplicação em materiais sinterizados de baixa densidade.

ABSTRACT

This work seeks to produce cermet (Ash-Fe) by powder technology using fly ash produced by burning mineral coal in thermoelectric for possible use and application in machining. This study has how specifically aims to characterize and analyze the mechanical and metallurgical properties of the samples obtained from the mixtures. Iron was used as component of the mixture due to the low cost and wide availability. After obtaining the gray light, was given the particle size of the light ash by sieves and cicloclassificador. In sequence, the chemical composition of the sample was performed through spectrometer for X-ray fluorescence. Also was also performed SEM analysis of light ash powder and pure iron. Mixtures were prepared with iron + 5% + Iron and Grey Iron + 10% Gray to study the interaction between the constituents. Also mixed Grey + 5% Iron and gray + 10% Iron, but broke both mixtures. So mixed Ash + 20% Iron, such composition constitute the cermet produced. Was performed the compression cermet (Ash + 20% Iron) produce dat pressures of 100 to 400 MPa and for samples iron + 5% and Iron and 10% ash was the compaction pressures was of the 100 to 800 MPa. Was determined and the apparent density and the green of all compositions and was performed the sintering of the same samples at temperatures ranging between 1150 °C to 1300 °C. Was performed The density of the sintered and was made analysis of hardness, micro hardness, metallography, SEM and EDS. After all the tests, set up the project and was completed fabrication tool for machining with cermet Ash + 20% Iron and machinability testing was conducted. In the mixture of ash with 20% iron was observed that increasing the sintering temperature decreases the density of the mixture, but increases the stiffness indicating the diffusion of the ceramic matrix in iron. The results show that it is possible to obtain cermets from the fly ash and yet demonstrated a potential for application in sintered material of low density.

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente tem sido uma constante nos dias atuais. O reaproveitamento de resíduos deixados na natureza vem se tornando uma opção para a sustentabilidade ambiental.

A cada dia mais pesquisas têm sido feitas a fim de descobrir novas formas de produção de energia e aperfeiçoar as maneiras já existentes. Com a queima do carvão na produção de energia dois tipos de cinzas são produzidos: as cinzas pesadas e as cinzas leves. Essas cinzas, muitas vezes, não são aproveitadas, causando poluição nos locais onde as termoelétricas estão inseridas. A sua utilização vem gerando estudos que objetivam tirá-las do meio. A utilização dos óxidos constituintes da cinza representa, por sua vez, uma vantagem ambiental pela diminuição da sua exposição ao meio ambiente.

Conforme CHEESEMAN e VIRDI (2005) e SONG *Et al.* (2011), as partículas de cinza apresentam formato predominantemente esférico e tamanho entre 10 e 150 μm com uma densidade aparente baixa (de 0,5 a 2 g/cm^3). A composição química dá-se basicamente de SiO_2 e Al_2O_3 , apresentando também certa quantidade de carbono. Com base nessas propriedades, pode-se estudar a possibilidade de utilização dessas cinzas para a preparação de produtos sinterizados.

Algumas pesquisas obtiveram grande sucesso com a utilização da cinza leve em construção civil e pavimentação. Porém, apenas 30% das cinzas geradas eram comercializadas. O restante era disposto em bacias ou era utilizado para recompor minas de carvão desativadas. (DEPOI *Et al.*, 2005; LEANDRO e FABBRI, 2001)

A cinza leve tem propriedades particulares que possibilitam o reaproveitamento em construção civil quando amorfa (pozolânica) tornando os materiais mais resistentes; e, por se tratar de material reaproveitável, essa utilização pode se tornar mais viável aos fabricantes de cimento e concretos.

Na elaboração do estudo foi utilizado o ferro como componente da mistura em função do baixo custo e vasta disponibilidade. Esse trabalho tem como objetivo geral produzir um cermet por metalurgia do pó convencional, utilizando a cinza leve produzida durante a queima de carvão mineral em termoelétrica para possível utilização. De acordo com CALLISTER (2002), os cermets são materiais compósitos de cerâmica e metal, nos quais um determinado carboneto, de elevada dureza, é envolvido em uma matriz de um metal que exerce a função aglutinadora das partículas.

Esse estudo tem como objetivos específicos caracterizar e analisar as propriedades mecânicas e metalúrgicas das amostras obtidas a partir das misturas, compactação e sinterização dos pós de ferro com cinza leve; produzir cermet por meio da mistura de ferro com cinza leve e caracterizá-lo, buscando aplicação deste cermet em usinagem.

Na Figura 1 é demonstrado as linhas de pesquisa em andamento do Projeto de Cinzas de Carvão Mineral do LdTM/UFRGS (Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

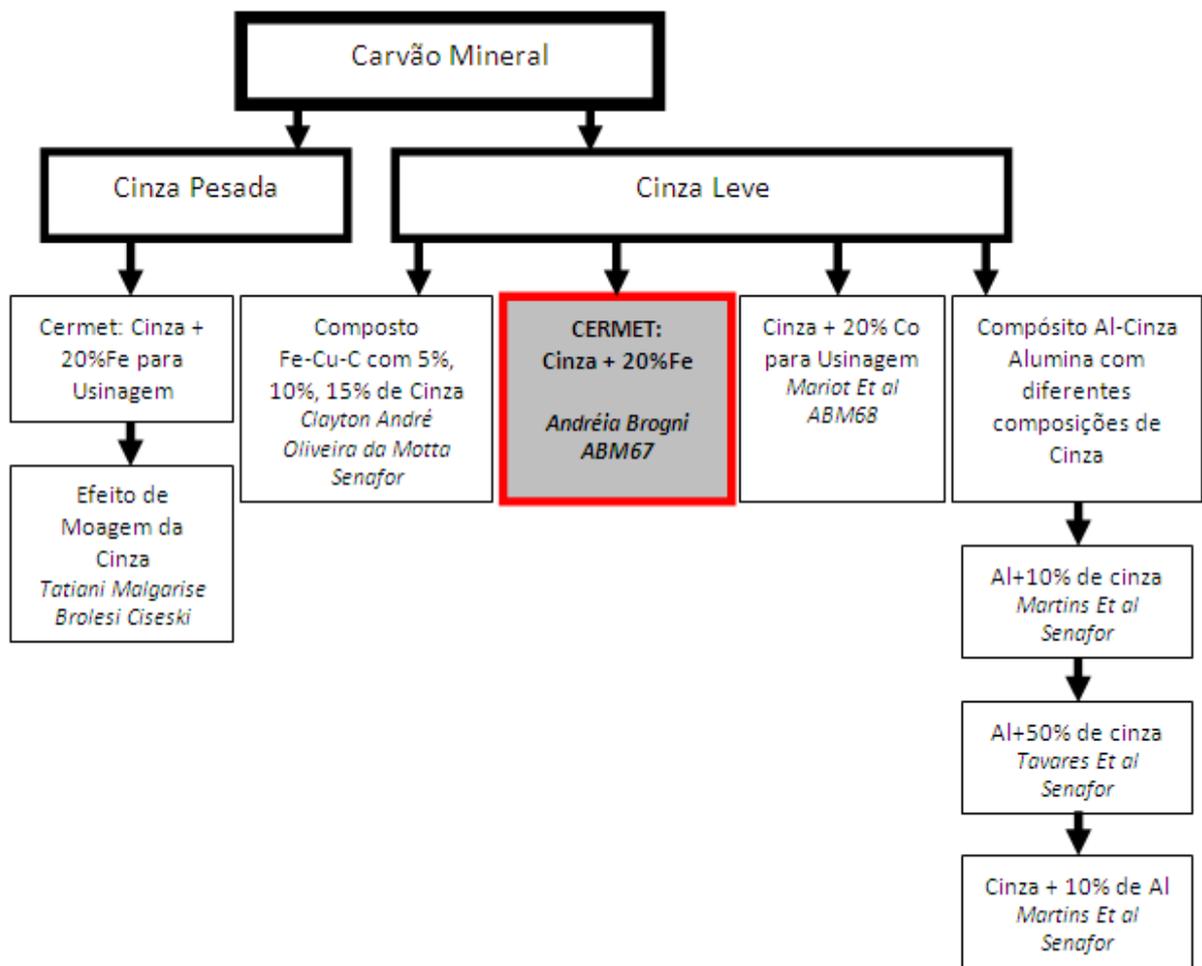


Figura 1: Linhas de Pesquisas do Projeto de Cinzas do LdTM/UFRGS (Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul)

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

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Do carvão às cinzas

A Camada subterrena originária de fósseis com acréscimo de restos de plantas que foram ao longo dos anos encobertos com camadas de matérias minerais formou o carvão. Os fósseis e restos de plantas ao serem soterrados tiveram aumento de pressão e temperatura sobre a matéria orgânica eliminando o oxigênio e o hidrogênio, ocorrendo assim o processo de carbonização, tendo uma grande concentração de carbono, principal substância do carvão (DEPOI, 2007)

As primeiras pesquisas sobre a utilização do carvão se deram em meados da revolução industrial quando começaram a utilizá-lo para fins industriais. No auge das pesquisas foi direcionado para dois aspectos: petrolífero e químico (DEPOI, 2007).

Atualmente o carvão é muito utilizado para geração de energia, contudo na queima do mesmo em termelétricas, é produzido um subproduto em grande quantidade, as cinzas (DEPOI, 2007).

As cinzas produzidas pela queima do carvão são resíduos sólidos inorgânicos e suas características físicas e químicas diferem-se conforme a característica do carvão do qual as originou, assim como o tipo da caldeira onde aconteceu a queima. (ADRIANO *Et al.*, 1980). Devido a esse aspecto é muito complexo precisar as características das cinzas. De forma globalizada as cinzas são minerais aluminossilicatos constituídos pelas fases: amorfa e cristalina. Trata-se de um pó de grãos finos com elementos pozolânicos, sendo composto por partículas vítreas e esféricas (QUEROL *Et al.*, 2002).

As fases de maturação do carvão são delegadas por classificação. Do menor para o maior estágio de carbonificação do carvão se dão dessa forma: Turfa, Sapropelito, Linhito, Carvão Sub-betuminoso, Carvão Betuminoso e Antracito (BORBA, 2001).

O carvão na indústria só pode ser utilizado no estágio do linhito, anterior ao do carvão sub-betuminoso e carvão betuminoso. A quantidade de cinzas obtida na queima do carvão determina a qualidade do mesmo. Quanto mais cinzas produzirem menor a qualidade do carvão (BORBA, 2001).

Atualmente, no Brasil, são gerados cerca de três milhões de toneladas de cinzas por ano, sendo que 80% de resíduos são cinza leve (também chamada de cinza mosca ou

volante, com diâmetro médio de partícula em torno de 50 μm) 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 (ASTM, 1980), (ROCHA *Et al.* 2001).

A Figura 2 apresenta o processo de geração de cinzas num complexo termoelétrico a carvão mineral.

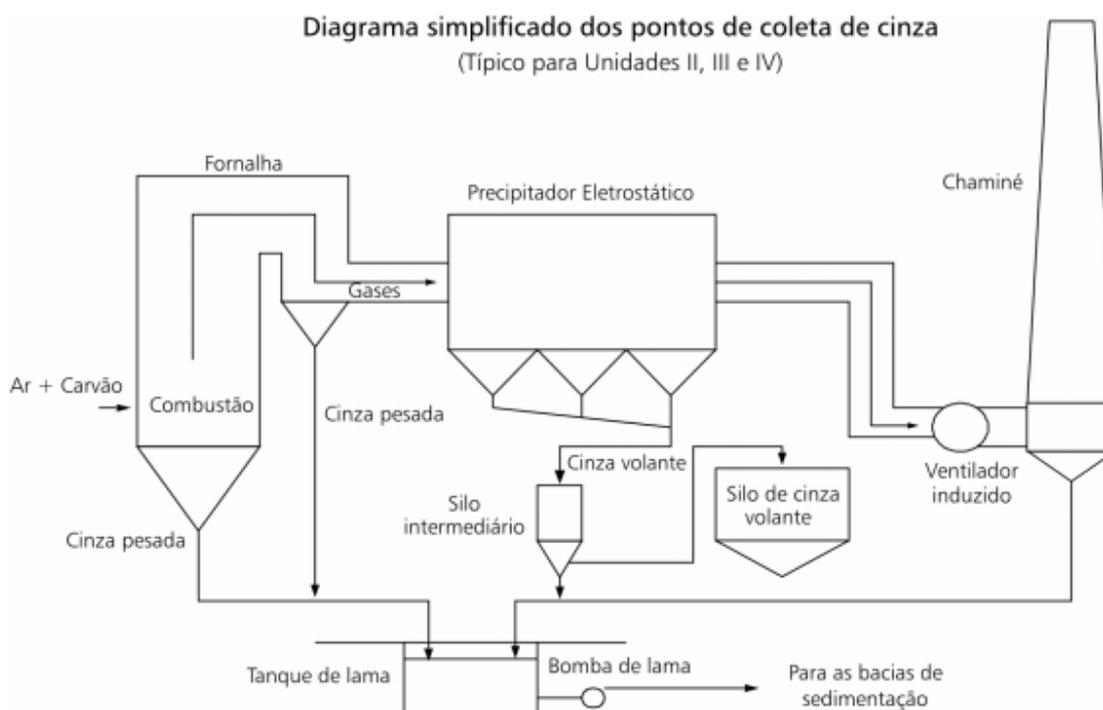


Figura 2: Fluxograma da geração de cinzas no complexo termoelétrico a carvão mineral - Complexo Jorge Lacerda
Fonte: (ROCHA E JOHN, 2003)

Geralmente as cinzas do carvão são reaproveitadas na construção civil, contribuindo para a sustentabilidade ambiental. As cinzas são utilizadas como material aditivo no concreto com a finalidade de obtenção de maior dureza no produto final. A utilização das cinzas altera a composição da pasta de cimento, influencia a hidratação e a microestrutura de argamassas e pasta, a permeabilidade e a resistência do concreto (SIQUEIRA, 2011).

OLIVEIRA (2011) afirma que a reutilização das cinzas do carvão em pavimentação é uma alternativa muito benéfica, tanto para as indústrias de construção civil, como para as indústrias que geram as cinzas. Essa atividade está associada a muitas motivações, entretanto a que mais estimula é a redução de custos.

SUNDSTRON (2012) afirma que as principais aplicações de cinzas de carvão em nível mundial são na construção civil: cimento Portland pozolânico, artefatos para a construção civil, pré-moldados de concreto, concreto celular, concreto asfáltico, aterros estruturais melhorados com aglomerado, bases e sub-bases de pavimentos.

Existem muitos estudos sobre o reaproveitamento das cinzas em processos industriais com o intuito de diminuir o impacto ambiental, IZIDORO (2008) cita: adsorção de gases como SO_x, NO_x, Hg, tolueno e hidrocarbonetos aromáticos; remoção de íons metálicos tóxicos como Cu, Pb, Cd, Ni, Zn, Cr, Hg, As, Cs, Sr; remoção de fosfato de águas residuárias; adsorção de fluoreto de águas residuárias; adsorção de corantes em soluções aquosas; remoção de fenol em água; estabilização de solos; síntese de materiais para remediação de solos; extração de metais preciosos; extração de carbono não queimado; desenvolvimento de blocos e tijolos; preenchimento de minas de carvão exploradas; aditivos em cimentos e cerâmicos; ladrilhos e refratário e síntese de zeólitas com alta capacidade de troca catiônica.

2.1.1 Resgate histórico da utilização do carvão

Ao final do século XVIII, com o aparecimento da era industrial, surgiram processos rudimentares de queima do carvão mineral para a obtenção de energia com o fim de movimentar as máquinas industriais. Esses processos, em sua maioria, se tratavam da queima de torrões sobre grelhas dentro das câmaras de combustão, que geravam energia mecânica ou elétrica, um resíduo denominado *clinder* (escória). O *clinder* era frequentemente utilizado como revestimento sobre as estradas de terra, substituindo o cascalho (ROCHA, 1999).

Com o passar dos tempos a queima do carvão foi ficando mais eficiente nas usinas térmicas. Por volta de 1920 os processos passaram a ser desempenhados com a queima realizada por meio da pulverização do carvão mineral dentro das caldeiras, diferentemente da utilização de torrões.

Com a evolução da queima do carvão, o *clinder* cedeu espaço a dois resíduos mais finos, que, infelizmente, se tornaram mais prejudiciais ao meio ambiente: a cinza leve e a cinza pesada. Contudo, não havia interesse em utilizar as cinzas para outros fins. Somente com o decorrer dos anos é que suas propriedades foram conhecidas e passaram a ser estudadas por vários pesquisadores, alcançando maior *status* às cinzas geradas no processo de

queima do carvão mineral na obtenção de energia. De simples rejeito passou a ser subproduto de interesse econômico relevante (ROCHA, 1999).

A produção da cinza, no Brasil, derivada da queima do carvão mineral se concentra na região sul, mais precisamente no Estado de Santa Catarina, aonde a produção de cinzas chega a 818.000 t ao ano. Destes, a quantia de 30% corresponde à cinza pesada (ROCHA, 1999).

Conforme HIGASHI *Et al.* (2003), a preocupação com as condições ambientais tem aumentado nos últimos anos, tendo embasamento legal para regularizar a existência e a manutenção dos órgãos poluidores. Estudos vêm sendo constantemente realizados com o intuito de contribuir na reutilização dos elementos produzidos pelas atividades poluentes. A queima de carvão mineral é caracterizada como uma das formas mais poluentes do meio ambiente na produção de energia elétrica.

Nas termelétricas depois da queima do carvão 80% das cinzas produzidas são recuperadas nas tubulações de gás e 20% ficam no fundo das caldeiras. As recuperadas nas tubulações são denominadas cinza volante ou leve; as que se encontram no fundo da caldeira são chamadas de cinza pesada (DEPOI, 2007).

A Figura 3 mostra algumas bacias de sedimentação de cinzas da Usina Jorge Lacerda, utilizadas para disposição final do resíduo. A maior bacia desse complexo termoeletrônico tem capacidade de armazenamento de aproximadamente 720.000 m³ de cinza pesada.



Figura 3: Bacias de sedimentação de cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda.
Fonte: CAMARA, 2011

2.1.2 Obtenção das cinzas

As usinas termelétricas geram, depois da queima do carvão mineral, dois subprodutos sólidos, ambos danosos ao meio ambiente e que têm suas características mutáveis por alguns fatores, entre eles a qualidade do carvão mineral empregado, a temperatura de queima e o tipo de caldeira utilizada (ROCHA, 1999).

As cinzas têm uma composição sílico-aluminosa e derivam da combustão do carvão pulverizado a altas temperaturas no interior das caldeiras, provocando vapores aquecidos que atuam na obtenção da energia elétrica (TINKLEPAUGH, 1960).

As áreas específicas de temperatura existentes no interior das caldeiras fazem com que as frações do carvão mineral, ora pulverizado, apresentem, após a queima, aspectos distintos que resultam em frações de cinzas com características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais diferentes. Assim, é possível classificá-las em dois tipos diferentes: leves ou secas e pesadas ou úmidas. Devido às altas temperaturas, as partículas tendem a tomar a forma arredondada, enquanto exposições limitadas à baixa temperatura provocam um menor grau de arredondamento, sendo que as frações mais finas são ricas em partículas esféricas (NARDI, 1998).

A cinza leve tem como característica básica a granulometria fina, não plástica e que proporciona propriedade pozolânica. É recolhida pelo fluxo dos gases advindos da combustão do carvão mineral, nas caldeiras das termelétricas por precipitadores eletrostáticos. Após, é movida para silos de estocagem para comercialização e emprego, principalmente na produção de cimentos pozolânicos (NARDI, 1998).

A cinza pesada deriva do agrupamento dos grãos semifundidos no interior da câmara de combustão ficando assentada na parte inferior da caldeira e arrastada para as bacias de sedimentação por mecanismo hidráulico.

O agrupamento do grão semifundido no interior da câmara é derivado da cinza pesada, que corresponde a uma média de 20% do material não queimado. Esse material é caracterizado por ser um resíduo inorgânico relativamente grosso, poroso, de cor cinza escuro e com granulometria predominantemente de areia, que cai por gravidade, através da caldeira, dentro de um tanque; e só quando há uma quantidade satisfatória de cinza pesada é que é extraída por meio de arraste hidráulico para as bacias de sedimentação, nas quais fica armazenada (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1998).

As cinzas de carvão são compostas por Si, Al e Fe, sendo que o ferro é encontrado em menor proporção que o silício e o alumínio. Ainda em sua composição pode-

se encontrar Mg, Ca, Ti, P, S, Na, e K. Parâmetros como convergência à evaporação e possíveis ligações entre os elementos irão influenciar na classificação dos elementos químicos para as cinzas geradas durante a combustão (DEPOI, 2007).

Conforme LEVANDOWSLKI E KALKREUTH (2008), conhecer as propriedades do carvão e suas cinzas é de suma importância para sua utilização industrial e, assim, diminuir seu impacto ambiental.

2.1.3 Cinza pesada

Estudos referentes às características químicas, físicas, mineralógicas, morfológicas e mecânicas das cinzas pesadas provenientes da queima do carvão mineral em caldeiras para geração de energia elétrica foram realizados, servindo de base científica ao desenvolvimento de produtos, nos quais se utilizou tal material (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1998).

Em seu composto, a cinza pesada apresenta principalmente sílica, alumina e óxido de ferro, com porcentagens menores de cálcio, magnésio, sulfatos e outras combinações. O arranjo químico desse tipo de material é oriundo principalmente da fonte de carvão mineral. Cinzas procedentes de linhitas ou carvões sub-betuminosos têm uma porcentagem maior de cálcio do que as cinzas decorridas de antracito ou carvão betuminoso (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1998). A Tabela 1 apresenta resultados referentes a análises químicas de amostras de cinza pesada, coletadas de diferentes regiões dos Estados Unidos.

Tabela 1: Composição química de cinzas pesadas americanas.

Fonte: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, (1998)

Localização		West Virginia		Ohio	Texas	
Tipos de carvão		Betuminosos			Sub-betuminoso	Linhita
Porcentagens	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
	CaO	0,4	1,4	0,4	15,3	6
	MgO	4,2	5,2	5,2	3,1	1,9
	Na ₂ O	1	0,7	0,8	1	0,6
	K ₂ O	0,3	0,2	0,2	-	0,1

Estudos revelam a utilização de cinza pesada de termoelétricas em aplicações diferenciadas. Os resultados alcançados indicam que essa cinza também é fundamentalmente formada por uma composição silico-aluminosa ou silico-ferrosa-aluminosa, concomitantemente, sendo que a totalização dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 correspondem, quase que à totalidade do peso dos componentes óxidos em sua composição química. Outros elementos como TiO_2 , MnO e P_2O_5 aparecem em uma quantidade mínima, totalizando apenas 1,19% em peso na análise feita por NARDI (1998) e 1,59% na análise feita por ROCHA (1999). Na Tabela 2 é apresentada a composição química de cinzas pesadas provenientes da Usina Jorge Lacerda.

Tabela 2: Composição química de cinzas pesadas provenientes da Usina Jorge Lacerda, Santa Catarina.

Fonte: NARDI (1998), ROCHA, (1999)

Análises por autor	NARDI (1998)	ROCHA (1999)	
Porcentagens em massa	SiO_2	41,3	57,0
	Fe_2O_3	30,3	5,8
	Al_2O_3	18,9	26,7
	CaO	1,4	0,8
	MgO	0,6	0,6
	K_2O	1,8	2,6
	Na_2O	0,2	0,2
	SO_3	-	-
	Perda ao fogo	4	4,6
	Total	98,5	98,3

São escassas as investigações relacionadas ao estudo da corrosão em metais provocada pela cinza pesada. Assim, KE (1990) fez uso do conhecimento do mecanismo de corrosão de metais em contato com solos para estudar a corrosão devida à presença da cinza pesada, considerando a natureza das cinzas pesadas e as condições do local depois da construção. KE (1990) concluiu que os parâmetros que melhor se relacionam com a corrosividade das cinzas são os de resistividade, pH, teor de cloreto solúvel e sulfato solúvel.

As fronteiras para se instituir a potencialidade não corrosiva das cinzas pesadas, baseadas nos critérios disponíveis de corrosividade em solo são: uma resistividade mínima de 1500 ohm-cm, um pH mínimo de 5,5, um máximo de 200 ppm de cloreto solúvel e um máximo de 1000ppm de sulfato solúvel. Caso qualquer um desses parâmetros citados não seja contrário, a cinza será qualificada como corrosiva (KE, 1990).

Dessa forma, das doze usinas do Estado de Indiana (Estados Unidos da América) analisadas por Lovell *Et al.* (1992), sete proporcionam cinzas classificadas como corrosivas, o que recomenda que cuidados especiais devam ser adotados quando se fizer uso desse tipo de resíduo. A Tabela 3 apresenta valores respectivos aos parâmetros de corrosividade das cinzas pesadas examinadas por LOVELL *Et al.*, (1992).

Tabela 3: Corrosividade das cinzas pesadas do estado americano de Indiana

Fonte: LOVELL *Et al.*, (1992)

Procedência da cinza	Resistividade (r) r >1500 ohm x cm	pH pH . 5,5	Cloro Solúvel (Cl) Cl ⁻ < 200 ppm	Sulfato Solúvel (SO ⁻² ₄) SO ⁻² ₄ < 1000	Corrosividade
Perry	980	4,8	15,5	598	C
Gibson	2201	7,6	7,3	1127	C
Schahfer 14	> 6663	9,6	0,4	50	NC
Schahfer 17	3082	8,6	6,1	383	NC
Gallegher	335	9,1	-	-	C
Mitchell	1771	8,0	-	-	NC
Wabash	1051	5,7	-	-	C
Richmond	247	8,2	-	-	C
Stout	4249	6,6	-	-	NC
Culley	486	8,5	-	-	C
Brown	213	3,2	-	-	C

Legenda: C (corrosivo), NC (não corrosivo)

As cinzas estudadas pela FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1998) apresentam partículas com trama superficial muito porosa. A grande maioria de grãos de cinza pesada apresenta tamanho constitutivo de areia, normalmente com 50 µm a 905 µm, transpondo na peneira 4,5 mm (nº 4), 10 a 60% passando na malha 0,42 mm (nº 40), 0 a 10% passando na peneira 0,075 mm (nº200), podendo apresentar, ainda, diâmetros máximos na faixa entre 19 mm e 31,1 mm (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1998).

A cinza pesada é normalmente um material bem granulado, embora possam ser descobertas alterações na distribuição granulométrica em amostras recolhidas em uma mesma usina, mas em épocas diferentes (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1998).

A Figura 4 apresenta a faixa granulométrica das cinzas pesadas obtidas na Usina Jorge Lacerda. Segundo os autores, LEANDRO (2002), LOVELL *Et al.*, (1991) e ROCHA *Et al.* (2001), a região em cor cinza, no gráfico da Figura 4, entre as duas curvas

granulométricas em vermelho, mostram a faixa de LOVELL. Estudos posteriores realizados por ROCHA *Et al.* (2001) e LEANDRO (2002) obtiveram curvas granulométricas distintas desta faixa. Isto se deve, provavelmente, devido às diferentes características dos carvões empregados no processo de queima.

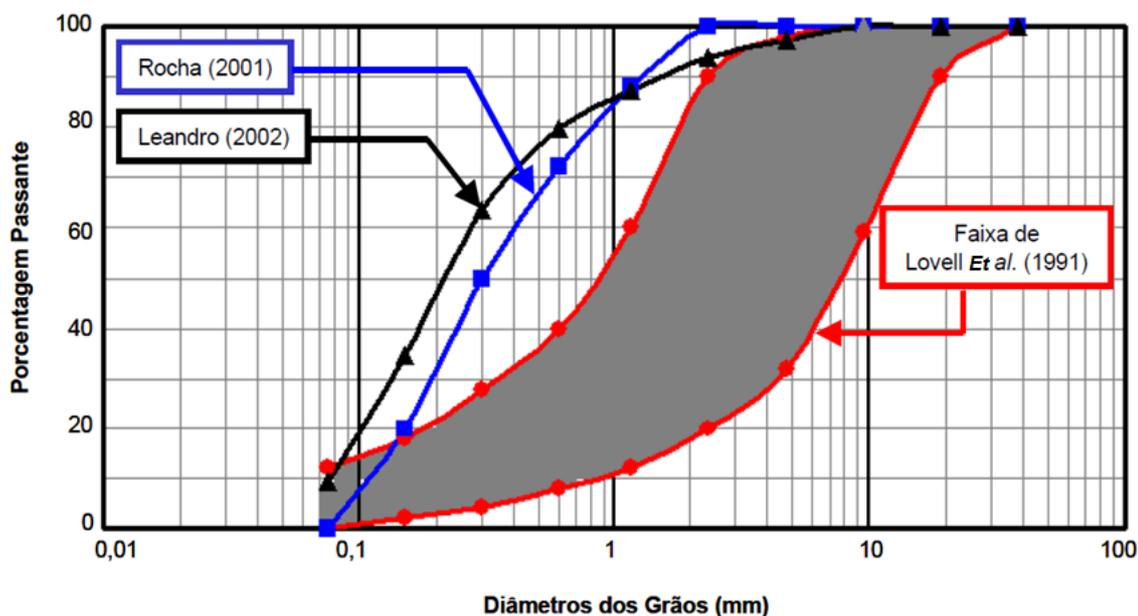


Figura 4: Faixa granulométrica das cinzas pesadas estudadas na Usina Jorge Lacerda
Fonte: LOVELL *Et al.*, 1991

Cinzas pesadas com baixa massa específica sempre têm uma textura muito porosa ou vesicular, favorecendo a deterioração das partículas quando submetidas a carregamentos ou compactação, uma vez que a textura porosa está relacionada com a resistência mecânica do material. Desse modo, a massa específica da cinza pode ser usada como um indicativo da sua qualidade (LOVELL *Et al.*, 1991).

Pesquisas realizadas qualificam a cinza pesada como um material não plástico e com variações nos valores de massa específica dos sólidos similares, compreendidas entre 2,0 e 2,70 g/cm³, apontando uma disparidade expressiva quando confrontadas com os resultados conseguidos por (LOVELL *Et al.*, 1991).

A cinza pesada é constituída por uma fase vítrea de natureza sílico-aluminosa, na maioria dos grãos de cinza e, secundariamente, por mulita, quartzo, hematita e magnetita, sendo comum a ocorrência de carbono amorfo associado aos grãos (NARDI, 1998).

NARDI (1998) cita que a cinza pesada da termelétrica Jorge Lacerda apresenta grande quantidade de esféricos vítreos, advertindo que esta cinza pode apresentar uma boa potencialidade pozolânica.

Geralmente as cinzas pesadas apresentam massa específica seca com valor máximo de 10 a 25% menores do que a dos materiais tipicamente granulares. A maior umidade ocorre normalmente nas cinzas pesadas quando comparadas aos materiais granulares convencionais (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1998)

2.1.4 Cinza Leve

A cinza leve é utilizada em muitos casos na construção civil e, principalmente na produção de cimento. A mesma, segundo estudos, é um ótimo estabilizante das “Minestone” que são rochas encontradas nas escavações do carvão (LEANDRO, 2005).

A cinza leve é retirada da queima do carvão nas caldeiras das termelétricas, por meio do fluxo de gases que são eliminados na combustão. A mesma adere nos equipamentos para posteriormente ser transportada para silos de estocagem e então poder ser vendida para produtores de cimentos pozolânicos. Atualmente, a cinza leve também está sendo utilizada em construção de bases e sub-bases para pavimentação ou na fabricação de argamassas e concretos (SILVA, 2011).

A cinza leve tem em sua composição óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), trióxido de enxofre (SO_3), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O) (KOCKAL E OZTURAN, 2011).

As cinzas volantes comparadas com as cinzas de fundo demonstram uma natureza mais volátil, pois apresentam um enriquecimento mais significativo nos elementos As, B, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl e Zn. (LEVANDOWSKI e KALKREUTH, 2008)

As cinzas volantes e/ou leve são usadas na confecção de materiais de construção, na fabricação de cimento, concreto, cerâmica, base de estrada, carga mineral na mistura de asfalto, em ribanceiras e recuperação de terra. Suas características físico-químicas dependem da fonte do carvão, assim como o tamanho das partículas, o tipo de queima do carvão e o grau de umidade. (SOCO e KALEMBKIEWCZ, 2009)

SOCO e KALEMBKIEWCZ (2009) demonstram na Tabela 4 a composição e as características da cinza leve conforme pesquisa feita pelos autores.

Tabela 4: Composição e características da cinza leve

Fonte: SOCO e KALEMBKIEWCZ (2009)

No.	Determinação	Valor
1	Distribuição de tamanho (% peso)	
	0.315–0.2 mm	2.7
	<0.2 mm	97.3
2	Densidade a granel (kg m^{-3})	540
3	Teor da parte combustível (% peso)	10.1
4	Teor da umidade (% peso)	0.47
5	Teor de óxido de metais (% peso)	
	SiO ₂	47
	Al ₂ O ₃	24
	Fe ₂ O ₃	14
	CaO	2.5
	MgO	3
	Na ₂ O	0,8
	K ₂ O	0,2
6	Teor do elemento (mg kg^{-1}):	
	Chumbo	137
	Cádmio	5
	Cobre	35
	Níquel	152
	Zinco	93
	Cobalto	34

2.2 Metalurgia do pó

A metalurgia do pó teve grande expansão ao longo de sua história. No ano de 1986 comercializaram 10 milhões de dólares, em 1989 foram 40 milhões, em 1994 150 milhões, em 1997 foram 400 milhões e em 2000 alcançou a marca de 700 milhões de dólares. Desse valor, 50% comercializados procederam dos Estados Unidos e na Europa e Ásia, outros 25%. Especialistas calcularam que em 2010 as vendas dos produtos fabricados por metalurgia do pó chegariam a dois bilhões de dólares (DUNKLEY, 2000).

O processo de fabricação de peças tendo como matéria prima o pó de metal, ou não é chamado de tecnologia do pó. O processo consiste em compactar e/ ou modelar a mistura em si e aquecê-la, a fim de melhorar a união da estrutura interna (MORO E AURAS, 2007).

A metalurgia do pó também é caracterizada pela fabricação e obtenção em grandes quantidades, é um procedimento que comporta um alto grau de isotropia. Possibilita a fabricação de peças complexas e simples com o mesmo grau de dificuldade. Inicialmente

na utilização da metalurgia do pó não há necessidade de ações secundárias ou de acabamentos (CASAGRANDE *Et al.*, 2010).

A Figura 5 mostra o fluxograma simplificado da rota de metalurgia do pó, segundo a empresa Qualisinter (2013).

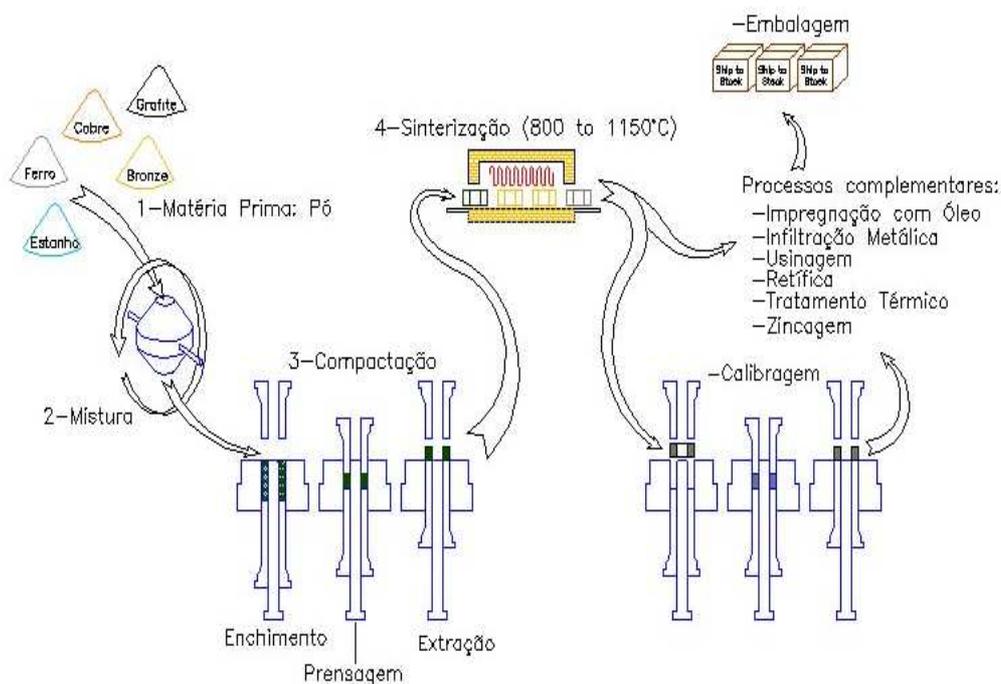


Figura 5: Fluxograma simplificado da rota de metalurgia do pó.
Fonte: QUALISINTER, 2013.

O processo de metalurgia do pó envolve, em princípio, três etapas fundamentais que consistem basicamente em: Mistura de pós; Compressão da mistura resultante, com o emprego de matrizes (esta operação denomina-se compactação). A sinterização caracteriza-se pelo aquecimento do compactado, produzindo uma ligação entre as partículas, conferindo-lhe resistência mecânica.

2.2.1 História da metalurgia do pó.

A respeito da técnica, uma notícia importante data o início do século XIX, quando, em 1829, Wallaston tornou público um processo de se produzir platina compactada

de um cloreto de amônio e platina. Esse trabalho é considerado o precursor da moderna metalurgia do pó (CHIAVERINI, 1992).

Entretanto, a importância no desenvolvimento industrial da técnica deu-se, de fato, no início do século passado, quando se estudou a possibilidade de fabricação, por sinterização, de molibidênio e tungstênio, ditos metais refratários, cujos pontos de fusão são extremamente elevados e impossibilitam sua obtenção pelos métodos metalúrgicos convencionais.

Pode-se dizer que a mais importante contribuição nesse sentido deu-se com o desenvolvimento, em 1909, de um processo de fabricação de fios de tungstênio dúcteis, para emprego em lâmpadas incandescentes, a partir de pó de tungstênio (CHIAVERINI, 1992).

Na Figura 6 mostra um corte vertical do equipamento que executa o processo de sinterização.

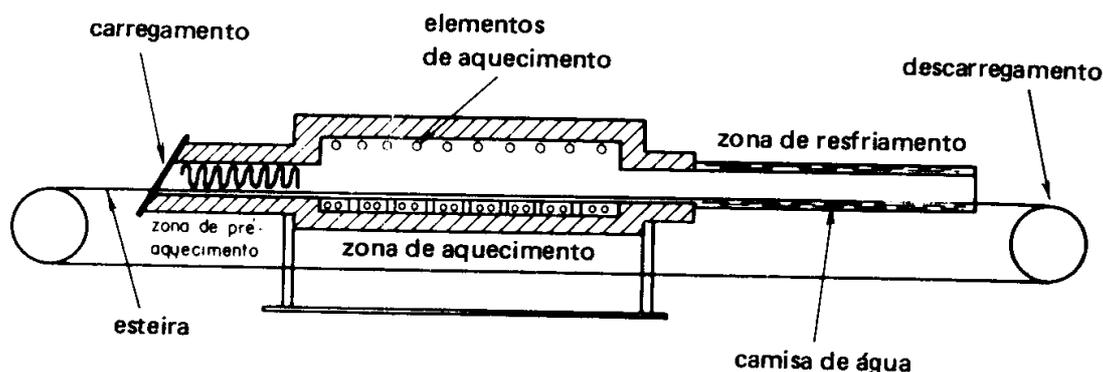


Figura 6: Corte vertical do equipamento no processo de sinterização.
Fonte: CHIAVERINI, 1992

Na metalurgia do pó, economizar o material é um dos principais focos, perdendo o mínimo possível de matéria prima, fato que na usinagem convencional não é possível. Algumas misturas podem ser obtidas por meio a metalurgia do pó, de forma mais acessível financeiramente que na usinagem convencional. (MORO E AURAS, 2007)

Deve-se admitir que o uso da metalurgia do pó tenha-se difundido muito nos últimos anos, pois o processo é econômico, rápido e permite a produção em grande escala de peças; exatamente iguais ou muito próximas das dimensões e formas definitivas, sem que haja necessidade de qualquer operação final de usinagem ou acabamento.

2.2.2 Aplicação técnica da metalurgia do Pó

A aplicação desta técnica está distribuída por todos os setores industriais, visto que produtos da metalurgia do pó são indispensáveis em alguns casos e em outros apresentam nítidas vantagens de aplicação, sobretudo de ordem econômica, em relação aos outros processos de fabricação.

Entre os produtos que praticamente são exclusivos da metalurgia do pó incluem-se os seguintes: (CHIAVERINI, 1992)

- Metais refratários, tais como o W, o Mo, e a Ta, difíceis de serem fabricados por outro processo;
- Metal duro ou carbeto de metais como W, Ta e Ti, aglomerados com cobalto;
- Mancais porosos autolubrificantes, de bronze ou ferro, igualmente impossíveis de se obter por outros processos;
- Filtros metálicos de bronze e aço inoxidável;
- Discos de fricção metálicos, à base de cobre ou ferro, misturados com substâncias de alto coeficiente de atrito;
- Certos tipos de contatos elétricos, W-Ag, W-Cu, Mo-Ag e Mo-Cu;
- Escovas coletoras de corrente de diversas composições (Figura 7).



Figura 7: Escovas elétricas para aplicação em motores elétricos e alternadores.
Fonte: IERVOLINO, 2009

Entre produtos que são mais eficientes e economicamente fabricados por metalurgia do pó incluem-se os seguintes:

- Peças de forma relativamente complexa e grande precisão dimensional, de ferro e aço, cobre e suas ligas, alumínio e suas ligas e outros metais e ligas, utilizadas em grande escala nos mais variados setores de máquinas, veículos e equipamentos (Figura 8).



Figura 8: Peças de forma relativamente complexa e grande precisão dimensional.
Fonte: IERVOLINO, 2009

- Certos tipos de ímãs permanentes (Figura 9).



Figura 9: Peças magnéticas da empresa DORST
Fonte: IERVOLINO, 2009

Algumas das vantagens do processo residem nos seguintes pontos: controle rigoroso da composição do material e eliminação ou redução a um mínimo das impurezas introduzidas pelos processos metalúrgicos convencionais; operação em atmosfera rigorosamente controlada ou em vácuo; redução ou eliminação das perdas de material ou produção de sucata; maior rapidez e maior economia de fabricação. (CHIAVERINI, 1992)

Contudo, a técnica apresenta ainda algumas limitações, como a baixa capacidade de compressão das prensas. À medida que as dimensões das peças a serem produzidas aumentam, maiores prensas devem ser usadas, o que pode tornar o processo inaplicável, tecnicamente, para grandes peças. Embora peças de alguns quilogramas já estejam sendo normalmente fabricadas, é necessário que os lotes de uma mesma peça sejam muito grandes, devido ao custo muito elevado das matrizes de compressão e recompressão. Esta limitação, entretanto, somente é válida quando o processo compete com os processos metalúrgicos convencionais. (CHIAVERINI, 1992).

2.2.3 Matérias primas

As matérias primas na metalurgia do pó são pós-metálicos e não-metálicos, cujas características tecnológicas influenciam não só no comportamento do pó durante o seu processamento, como também nas quantidades finais do produto sinterizado.

As características que devem ser conhecidas e controladas são as seguintes: (BALSHIN, 1968)

- O tamanho da partícula e sua distribuição entre 400 a 0,1 micrometros;
- A forma da partícula, que exhibe grande variedade de formas como as esféricas uniformes, esferóides ou em gotas, esponjosa, irregular, dendrítica, angular;
- A porosidade interna da partícula, que afeta a porosidade do produto acabado, além de influenciar o comportamento do pó durante seu processamento;
- A estrutura da partícula, que consiste em grande número de grãos muito finos que tendem a promover compressibilidade do pó, ao passo que partículas de um só grão ou de poucos grãos apresentam maior resistência à compactação pela aplicação de pressão;
- A superfície específica da partícula, sendo o número de pontos de contato entre as partículas durante a sinterização.

- A densidade aparente, que é a relação de gramas por cm^3 , sendo importante porque na maioria das matrizes de compressão o enchimento de suas cavidades é feito por volume;
- A velocidade de escoamento, que é a capacidade do pó escorrer, sob condições atmosféricas, sobre planos inclinados, no interior da cavidade da matriz, dentro de um determinado intervalo de tempo;
- A compressibilidade, que é capacidade de um pó ser conformado em briquete de um volume predeterminado a uma dada pressão ou a relação entre a densidade aparente do briquete simplesmente comprimida, chamada densidade a verde, e a densidade aparente do pó;
- A composição química e a pureza que podem ser conseguidos com pós metálicos

2.2.4 Ferro

O ferro é um dos elementos mais abundantes no planeta, entre os metais é superado apenas pelo alumínio. É flexível e dúctil, sendo comparado a outros metais é considerado um fraco condutor de eletricidade. Em baixas temperaturas tem magnetização fácil, contudo quando aquecido, torna sua magnetização difícil (TURRER, 2004).

Segundo SOUZA (2007) o ferro é uma substância fundamental que é constituinte praticamente de todos os seres vivos, variando em algumas funções, é encontrada na hemoglobina e o organismo humano necessita de 0,01 mg por dia.

De acordo com TURRER (2004) o ferro em sua existência nativa somente é encontrado em meteoritos, basaltos da Ilha de Disko, a oeste da Groenlândia e sedimentos carbonáceos do Missouri nos Estados Unidos da América. Geralmente o ferro é encontrado sendo associado ao Dióxido de Carbono, Oxigênio, Enxofre ou Silício formando carbonatos, óxidos, sulfetos e silicatos.

Em sua maioria, os minérios de ferro encontrados no Brasil são constituídos predominantemente por óxidos e hidróxidos de ferro, em especial hematita e quartzo. (WALDE apud TURRER, 2004)

Conforme o Instituto Brasileiro de Mineração (2012) o Brasil ocupa a segunda posição no ranking de produção de minérios de ferro. Em 2011 ocupava a terceira posição, ficando atrás da China e da Austrália.

2.2.5 Fabricação de pós metálicos

Conforme CHIAVERINI (1992), os métodos de fabricação de pós metálicos podem ser:

- Moagem – se presta principalmente para reduzir determinados pós a partículas de menores dimensões, como é o caso dos carbeto duros sinterizados. A Figura 10 exibe um moinho de esferas.

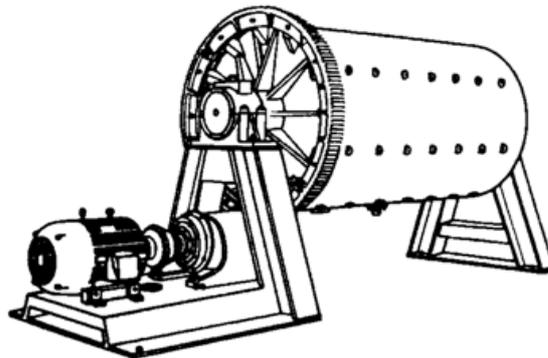


Figura 10: Moagem: realizada em moinhos de bola (esferas de metal de alta dureza).
Fonte: ASM HANDBOOK, 1998.

- Atomização – consiste em forçar o metal ou a liga, no estado líquido, a passar num pequeno orifício e desintegrar a corrente líquida formada, mediante um jato de ar comprimido, vapor ou gás inerte, o que promove a solidificação do metal em partículas finamente divididas, as quais são colhidas em coletores especiais por meio de um sistema de sucção, conforme Figura 11.

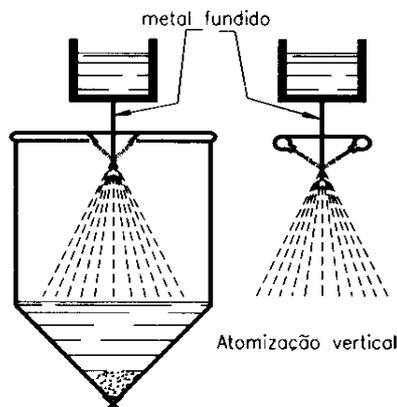


Figura 11: Pulverização de metal fundido que se solidifica formando o pó.
Fonte: CHIAVERINI, 1992

- Redução – feita a partir de óxidos, os quais são moídos até certa granulometria sob condições controladas de temperatura e pressão;
- Condensação – combinação de dois processos químicos: condensação e redução. A primeira etapa consiste na evaporação de um óxido do metal, seguindo-se uma redução a vapor de zinco por parte de CO. O vapor de zinco é condensado na forma de pó;
- Decomposição térmica – apresenta alta pureza e excelente compressibilidade, além de ótimas propriedades de sinterização.
- Eletrólise – permite rigoroso controle das características dos pós, pela regulação de intensidade de corrente, temperatura do banho, etc.

2.2.6 Compactação

A compactação dos pós é uma das operações básicas do processo. O pó é colocado em cavidades matrizes, montadas em prensas de compressão, especialmente fabricadas para essa finalidade. Na sequência, é aplicada sobre ele carga determinada, de acordo com o tipo de pó utilizado e com as características geométricas finais das peças sinterizadas.

A Figura 12 apresenta o processo de compactação de pós-metálicos em matriz e seus punções.

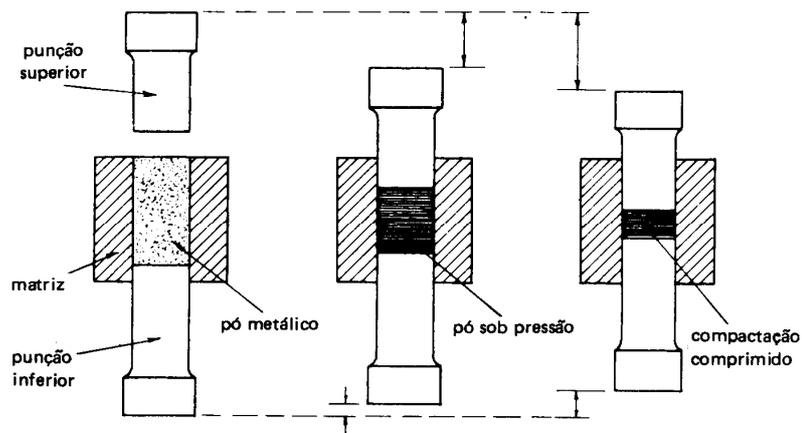


Figura 12: Formação da geometria da peça em matrizes.

Fonte: CHIAVERINI, 1992

A Figura 13 apresenta as ferramentas usadas para compactação de pó metálico de uma engrenagem.

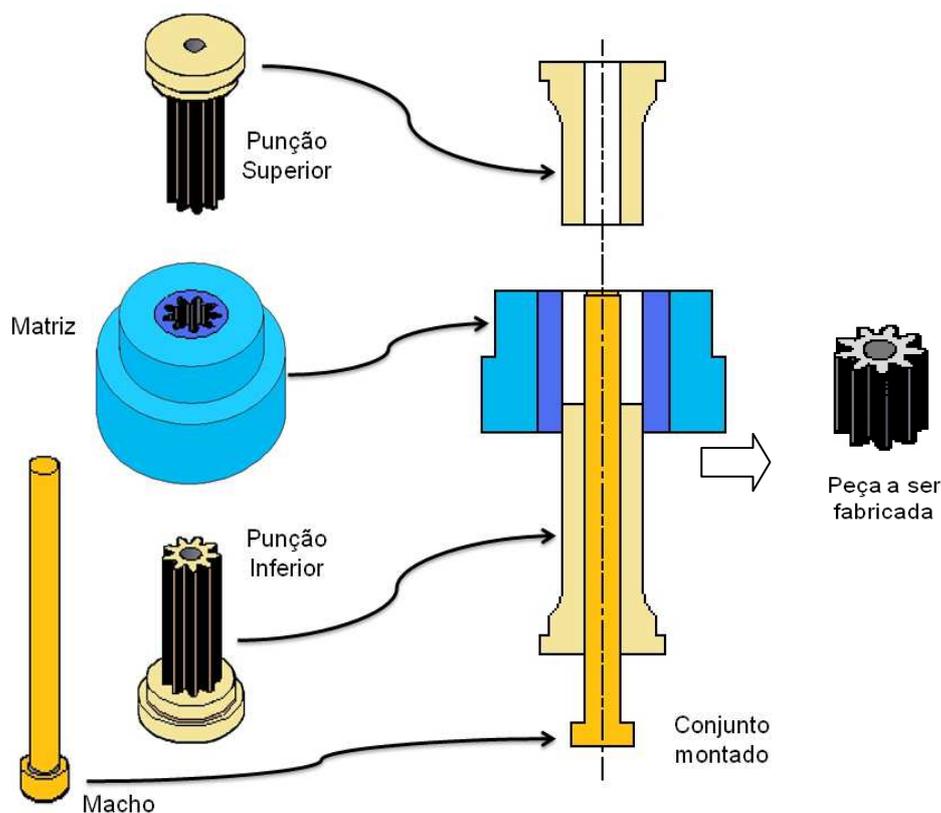


Figura 13: Exemplo de compactação.
Fonte: IERVOLINO, 2009

2.2.7 Sinterização

A sinterização consiste no aquecimento a temperaturas específicas das peças que sofreram processos de compressão, sempre abaixo do ponto de fusão do metal-base da mistura, eventualmente acima do ponto de fusão do metal secundário da mistura, em condições controladas de velocidade de aquecimento, tempo e temperatura, velocidade de resfriamento e atmosfera do ambiente de aquecimento. (CHIAVERINI, 1992).

De maneira simplificada, sintetiza a definição de sinterização como sendo aquecimento para produzir ligação entre partículas. Na verdade o processo de sinterização se baseia na ligação atômica entre superfícies de partículas vizinhas (CHIAVERINI, 1992).

O processo de sinterização pode ser definido como sendo um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de determinado material,

inicialmente em contato mútuo, adquira resistência mecânica. Sua força motora é o decréscimo da energia superficial livre do conjunto de partículas, conseguido pela diminuição da superfície total do sistema. Em muitas ocasiões, isto traz como consequência a eliminação do espaço vazio existente entre as partículas, resultando em um corpo rígido e completa ou parcialmente denso (TINKLEPAUHG, 1960 APUD FIGUEREDO, 1982).

A sinterização é utilizada para se fabricar peças metálicas, cerâmicos e compósitos metal-cerâmica, sendo parte integrante e principal de técnicas denominadas metalurgia do pó e cerâmica, que se incumbem justamente da fabricação dos respectivos produtos e a partir dos pós dos constituintes (TINKLEPAUHG, 1960 APUD FIGUEREDO, 1982).

Durante a sinterização, a porosidade da estrutura é fechada. Para isso, o material deve ser deslocado para preencher os espaços vazios. É justamente o modo como este material é deslocado que indica o tipo de sinterização. (TINKLEPAUHG, 1960 APUD FIGUEREDO, 1982).

Desse ponto de vista, a cinética de sinterização difere grandemente quando existe ou não um líquido presente na estrutura. Por isso, divide-se o processo de sinterização em dois tipos básicos: a sinterização por fase líquida e a sinterização por fase sólida. Todas as variações de cinética de sinterização encontradas ao se sinterizar materiais específicos podem ser enquadradas dentro destas duas classes básicas (TINKLEPAUHG, 1960 APUD FIGUEREDO, 1982).

CHIAVERINI (1992) define em três os mecanismos essenciais de transporte do calor que podem atuar durante o processo de aquecimento. São:

- A radiação: O transporte radiativo de calor ocorre através do espaço, sob a forma de ondas eletromagnéticas.
- A convecção: Na convecção não há necessidade, portanto, de um meio material como suporte. O transporte por convecção é o mecanismo geralmente mais importante quando o meio que lhe serve de suporte é um fluído. Neste tipo de transporte, um corpo a certa temperatura está em contato com um fluído a uma temperatura diferente.
- A condução: A transmissão de calor por condução é característica do transporte através dos sólidos. As entidades responsáveis por esse transporte são os elétrons de condução e/ou as vibrações da rede cristalina.

Observa-se na Figura 14 que após a sinterização há uma alteração no volume da peça, pois acontece a contração linear e volumétrica ocorrendo a variação dimensional. Na Figura 14 é possível visualizar a representação do volume reduzido por meio das faixas brancas.

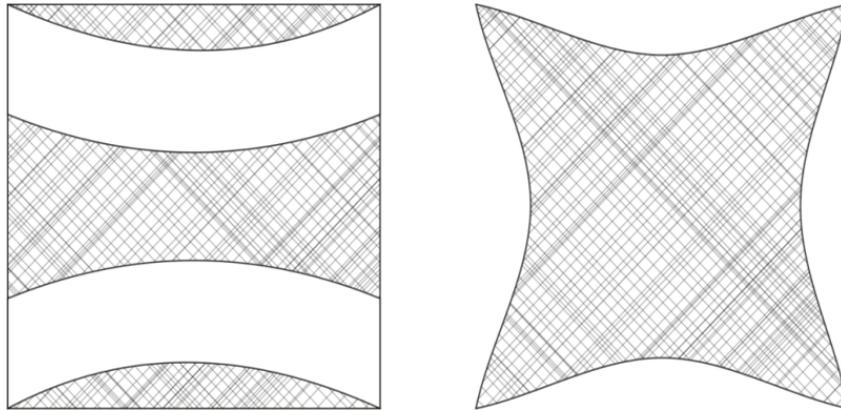


Figura 14: Variação dimensional em seções da peça antes e depois da sinterização.
Fonte: CHIAVERINI, 1992

A sinterização é responsável por retirar o lubrificante utilizado na compactação, promover a ligação metalúrgica entre as partículas de pó e definir a microestrutura do material. As atmosferas protetoras empregadas na sinterização, além da sua completa ausência (sinterização sob vácuo), compreendem: (CHIAVERINI, 1992)

- Hidrogênio puro e seco, para metal duro, aço inoxidável, imãs permanentes, etc.;
- Amônia (NH_3) dissociada contendo 75% de hidrogênio e 25% de nitrogênio, para peças de ferro e aço;
- Gás endotérmico, contendo de 35 a 40% de hidrogênio, em torno de 20% de CO, de 40 a 45% de nitrogênio e cerca de 1% de CH_4 , para peças de Fe-C e Fe-C-Cu;
- Gás gasogênio, contendo de 60 a 65% de nitrogênio e 30 a 35% de CO, para peças de ferro e bronze (pouco usados).
- Gás exotérmico, contendo de 1 a 12% de hidrogênio, 70 a 86% de nitrogênio, 1 a 10% de CO e 5 a 10% de CO_2 , para peças de Fe.

A Tabela 5 apresenta as relações entre as temperaturas, o tempo e a atmosfera de sinterização típica para vários materiais.

Tabela 5: Temperaturas, tempos e atmosfera de sinterização.

Fonte: USMEN (1993)

Material	Temperatura °C	Tempo mín.	Atmosfera
Bronze	760 – 870	10 – 20	Hidrogênio, amônia dissociada, gás exotérmico.
Cobre	840 – 900	12 – 45	Hidrogênio, amônia dissociada, gás exotérmico.
Latão	840 – 900	10 – 45	Hidrogênio, amônia dissociada, gás exotérmico.
Ferro e Fe-grafita-Cu	1000 – 1150	8 – 45	Hidrogênio, amônia dissociada, gás exotérmico.
Níquel	1000 – 1150	30 – 45	Hidrogênio, amônia dissociada, gás exotérmico.
Aço Inoxidável	1090 – 1300	30 – 60	Hidrogênio, amônia dissociada, vácuo.
Ímãs Alnico	1215 – 1300	120 – 150	Hidrogênio
Metal Duro	1425 – 1480	20 – 30	Hidrogênio – vácuo

USMEN (1993) explica, ainda, que a força motora para a ocorrência de qualquer tipo de sinterização é a diminuição da energia livre superficial do conjunto de partículas. Essa diminuição ocorre por meio do desaparecimento da interface material/poro, que é substituída pela interface material/material, quando a porosidade desaparece.

Esses dois tipos básicos de sinterização, por fase sólida e por fase líquida, são capazes de densificar total ou parcialmente a estrutura, sendo que com o primeiro tipo é possível se obter uma estrutura com porosidade controlada, enquanto que o fechamento total da mesma é mais facilmente obtido através da sinterização por fase líquida.

2.2.7.1 Sinterização por fase sólida

A teoria da sinterização por fase sólida é estruturada por dois antecedentes básicos: (a) “a força motriz do processo é a diminuição da energia superficial livre via diminuição da superfície” e (b) “para que isto aconteça é necessário o deslocamento de matéria que sairá das partículas em direção à porosidade, preenchendo-a”. Há outras evidências que simplificam esse tipo de modelo; assim como; quando as partículas de pó são esféricas, são todas do mesmo tamanho e estão ocupando o espaço adequadamente. (SILVA E ALVES JUNIOR, 1998).

Algumas experiências realizadas mostram alguns pescoços formados e que cresceram nos espaços onde não ocorria nenhum contato. Essa formação e crescimento dos pescoços induzem à diminuição da energia superficial. Assim, formam-se as diretrizes básicas para a elaboração do modelo matemático. Resume-se em relacionar a taxa de crescimento do pescoço à taxa de material transportado. Os princípios da sinterização são tão amplos que o mais viável seria elaborar um modelo de sinterização para cada sistema. (SILVA E ALVES JUNIOR, 1998).

2.2.7.2 Sinterização por fase líquida

A sinterização por fase líquida acontece devido à formação de líquido na estrutura. Esse 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. A ocorrência desse líquido é a maior diferença entre os dois tipos básicos de sinterização, e tem papel decisivo na determinação dos mecanismos de sinterização e do aspecto final da estrutura sinterizada. Em termos gerais, pode-se dizer que, em comparação à sinterização por fase sólida, este tipo de sinterização é mais rápido e fecha a estrutura mais facilmente. A sinterização com fase líquida é um modo bastante atraente de consolidação de materiais dificilmente sinterizáveis por fase sólida e para a obtenção de materiais compósitos (GERMAN, 1985).

Os mecanismos de densificação atuantes aqui são bastante condicionados à quantidade de líquido presente na estrutura e ao intercâmbio deste líquido com a fase sólida (molhabilidade, dissolução entre sólido e líquido, reação para formação de outras fases com

absorção ou liberação de energia, etc.). Em todo caso, existe sempre uma importante contribuição da ação das forças de capilaridade (GERMAN, 1985).

Se a molhabilidade do sólido pelo líquido for favorável, essas forças de capilaridade promovem um forte e rápido rearranjo de partículas que leva à densificação. Se a molhabilidade é desfavorável, as forças de capilaridade atuam em sentido oposto, impedindo a densificação e promovendo até o rompimento da estrutura. O termo molhabilidade é usado para designar a tendência que tem um líquido para formar uma interface com um sólido. Quanto maior a área da interface sólido-líquido formada, maior será a molhabilidade, que pode ser expressa pelo ângulo de contato entre a fase líquida e o substrato sólido (TINKLEPAUGH, 1960).

O conceito de molhamento, bem como, as condições termodinâmicas, podem ser estendido às duas fases sólidas em contato, uma vez que ocorrem interações entre essas duas fases, assim como ocorre quando existe o líquido. A principal diferença entre o molhamento líquido-sólido e sólido-sólido está na cinética, pois o deslocamento de matéria para o molhamento na fase sólida tem características bem distintas daquelas do deslocamento em fase líquida. O tempo de molhamento é uma das consequências dessas diferenças. (ROCHA *Et al.*, 2001)

2.3 Cermets

A palavra 'cermet' foi criada, na verdade, pela Força Aérea dos EUA. É uma combinação de dois materiais, metal e cerâmica. Propriedades físicas básicas de metais incluem ductilidade, alta resistência e alta condutividade térmica. Cerâmicas possuem propriedades físicas básicas, como um alto ponto de fusão, estabilidade química e, especialmente, resistência à oxidação. (ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1980).

Um cermet é uma combinação heterogênea de metais ou ligas com pelo menos uma fase cerâmica. Para FIGUEREDO (1982), essa definição, em princípio, não faz alusão às concentrações das fases metálica e cerâmica. Num segundo momento, no entanto, a mesma foi modificada, restringindo a concentração da fase cerâmica a uma faixa compreendida entre 15 e 85% em volume, permitindo, ainda, uma ligeira intersolubilidade das fases na temperatura de fabricação.

Considerando as dificuldades à avaliação de uma ligeira intersolubilidade e a rígida limitação de concentrações imposta pela definição acima, sugeriu-se que qualquer mistura cerâmico-metal manufaturada por metalurgia do pó seja considerada um cermet, desde que os componentes metálicos e cerâmicos tornem-se diretamente efetivos. (PETZOW *Et al.*, 1968).

Perante desse pressuposto, é possível, então, entender que não são cermets as combinações metal-cerâmica, cujas modificações nas propriedades são produzidas indiretamente pela influência de uma fase sobre a outra. Os metais endurecidos por dispersão de inclusões cerâmicas com a finalidade de inibir o movimento de discordâncias, ou os metais onde as partículas cerâmicas são adicionadas com a finalidade de suprimir o crescimento de grão; e materiais cerâmicos com inclusões metálicas também destinadas a inibir o crescimento do grão, não serão considerados cermets (FIGUEREDO, 1982).

ONDRACEK e SPLICHAL (1971) de forma mais ampla, definem cermets como combinações de materiais, compostas de pelo menos uma fase, cuja ligação dominante é metálica; e outra fase, cuja ligação é predominantemente não metálica, composta de elementos metálicos e não metálicos.

2.3.1 História do cermet

Durante a II Guerra Mundial, os cientistas alemães desenvolveram cermets à base de óxido como substitutos para as ligas. Eles perceberam a possibilidade do seu uso para as seções de alta temperatura de novos motores a jato, assim como lâminas de turbina de alta temperatura. Cerâmicas, hoje, são rotineiramente empregadas em incineradores de motor a jato, uma vez que fornecem uma câmara resistente ao calor. Lâminas de turbina de cerâmica foram desenvolvidas. São mais leves que o aço e permitem uma maior aceleração das aglomerações da lâmina. (ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1980)

O material cerâmico desenvolvido, tendo como as primeiras substâncias utilizadas: o óxido de magnésio (MgO), óxido de berílio (BeO) e óxido de alumínio (Al_2O_3) para a parte de cerâmica. A Universidade Estadual de Ohio foi a primeira a desenvolver cermets a base de Al_2O_3 com os pontos fortes de alta tensão de ruptura em torno de 1200°C. A Kennametal, uma metalúrgica e empresa de ferramenta com base em Latrobe (Pensilvânia, EUA) desenvolveu o primeiro carbeto de titânio com resistência a 19,3 MPa

em 100 horas, pois os motores a jato operavam na temperatura de 1200°C. (ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS,1980)

O controle de qualidade na fabricação desses compostos de metal cerâmica era difícil de padronizar. A produção teve que ser mantida para pequenos lotes e as propriedades variavam muito. A falha do material era geralmente um resultado de falhas detectadas, normalmente nucleadas durante o processamento. (ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1980)

2.3.2 Aplicações da usinagem

Ao longo da história da usinagem, os cermets ganharam fama de suscetíveis a repentinas e imprevisíveis falhas das pastilhas e, como tal, não têm sido fáceis de compreender em sua aplicação (CHIAVERINI, 1992)

As próprias recomendações dos fornecedores são frequentemente contraditórias: alguns especificam o uso somente se os fatores operativos no torneamento de acabamento estiverem exatamente corretos; outros indicam uma área ampla de utilização, incluindo o exigente semi-acabamento. Além disso, os cermets são amplamente usados no fresamento de materiais de peças duras com êxito. Assim, parece não haver diretrizes bem definidas sobre onde os cermets se encaixam na usinagem. (CHIAVERINI, 1992)

2.3.2.1 Aplicações da Cerâmica-metal

A construção de tubos de vácuo foi um dos primeiros sistemas críticos da indústria de eletrônicos que empregavam a utilização da liga de cerâmica e metal. Cientistas alemães reconheceram que os tubos de vácuo com melhor desempenho e confiabilidade poderiam ser produzidos pela substituição de cerâmica por vidro. Tubos de cerâmica podem ser desgaseificados em altas temperaturas. Por causa do selo de alta temperatura, os tubos cerâmicos suportam temperaturas mais elevadas. São, também, mecanicamente mais fortes e menos sensíveis ao choque térmico do que os tubos de vidro. (BALSHIN, 1968). Hoje, revestimentos de tubos de vácuo cermet provaram ser a chave para sistemas de água quente solar.

A Cerâmica-metal também tem sido utilizada em células a combustível e outros dispositivos que convertem energias nucleares, químicas ou térmicas, em eletricidade. O selo de cerâmica-metal é necessário para isolar as seções elétricas de turbina-driven, os geradores projetados para operar em metal líquido e vapores corrosivos. (BALSHIN, 1968).

Os cermets têm aplicações gerais em:

- Peças de cerâmica têm sido usadas em conjunto com peças de metal como materiais de fricção para freios e embreagens. (BALSHIN, 1968)
- O Exército dos Estados Unidos e o exército britânico obtiveram uma extensa pesquisa no desenvolvimento de cermets. Estes incluem o desenvolvimento de armadura cerâmica à prova de projétil leve para soldados e também armaduras Chobham. Segundo fontes não seguras, Armadura de Chobham é a designação para a blindagem desenvolvida na década de 1960, feita em cerâmica. Ela foi descrita como um composto de ladrilhos cerâmicos integradas numa matriz de metal e afixado a uma placa de suporte e as camadas elásticas.
- Cermets também são usados na usinagem de ferramentas de corte.
- O cermet foi pesquisado por ser adequado para armazenamento de resíduos nucleares. Compostos semelhantes também foram pesquisados para uso como fonte de combustível.

2.3.3 Propriedades mecânicas dos cermets

BALSHIN (1968), investigando as relações entre as propriedades mecânicas de metais porosos e cermets, propôs que as variações na resistência mecânica desses materiais, provocadas pelas variações na concentração dos vazios (ou da fase cerâmica), podem ser explicadas pelas correspondentes alterações que ocorrem na área onde efetivamente atuam os esforços impostos ao material. Essa proposição, a princípio intuitiva, foi confirmada posteriormente por várias experiências, tanto em materiais metálicos ou cerâmicos porosos como em cermets. (ASTM, 1980), (BORUVKA *Et al.*, 2011), (ROCHA *Et al.*, 2001), (ROSS e BECHER, 2011), (SILVA, 1998)

O efeito da porosidade e/ou das partículas cerâmicas na resistência mecânica macroscópica de metais sinterizados e cermets, consiste na redução da área da matriz na seção normal à direção da tensão aplicada ao material. Em cermets, onde não haja ligação

entre as fases, pode-se, ainda, considerar as partículas cerâmicas como poros, cujas formas são muito pouco alteradas, devido à presença de tensões externas. (BALSHIN, 1968)

FIGUEIREDO (1982, p 12) salienta que “as propriedades mecânicas de 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 de cermets concentra-se na determinação de relações que exprimam a dependência da resistência mecânica do cermet, a resistência mecânica da matriz e a concentração da fase cerâmica e/ou porosidade.

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

A escolha do material usado para este estudo foi definida em virtude de ser um material disponível, de baixo custo e fácil obtenção. A cinza leve proveniente da queima do carvão mineral de termoelétrica foi utilizada juntamente com o ferro elementar comercial para a fabricação de ferramentas do tipo cermets no uso do processo de usinagem. O procedimento experimental adotado é demonstrado resumidamente através do fluxograma da Figura 15.

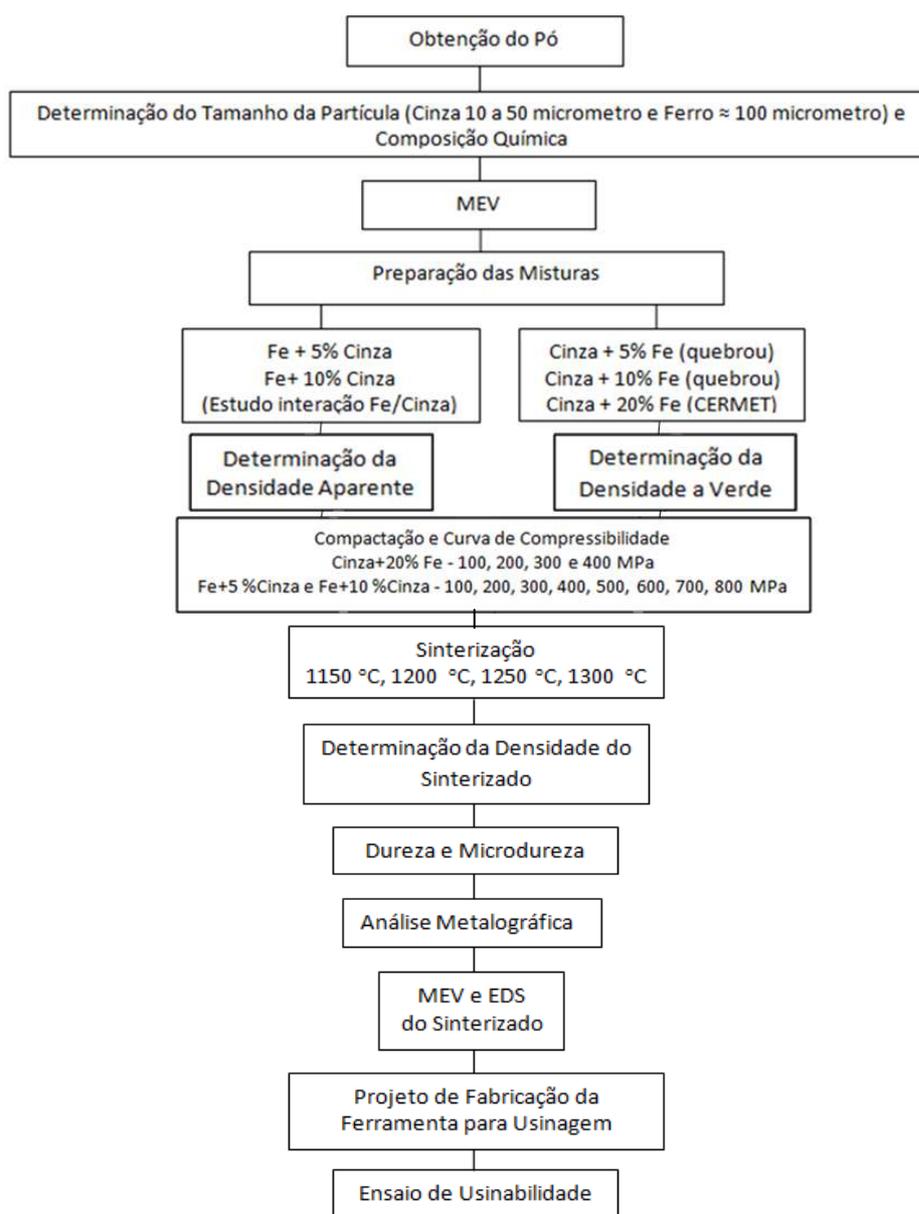


Figura 15: Fluxograma do trabalho desenvolvido

3.1 Obtenção dos pós

Os pós usados foram, a cinza leve fornecida pela Termoelétrica TRACTEBEL ENERGIA – Capivari de Baixo –SC e o ferro 99% de pureza -325 Mesh (44 micrometro) fornecido pela empresa HOGÄNÄS DO BRASIL.

3.2 Fluorescência de raio X

A análise química instrumental por fluorescência de raio X é uma técnica não destrutiva que se baseia em medir as intensidades dos raios X emitidos pelos elementos químicos constituintes de uma amostra, onde quando excitados os átomos, pode-se analisar as substâncias existentes na mesma. (SALVADOR, 2004 APUD FIGUEIREDO, 2008)

Um sistema detector é usado para medir a posição de picos de fluorescência de raios X para uma identificação qualitativa dos elementos presentes e também para medir a intensidade dos picos para uma determinação quantitativa da composição. (FIGUEIREDO, 2008, p. 89)

Segundo Nascimento Filho (1999) apud Figueiredo (2008) a técnica de fluorescência de raios X é utilizada para analisar especialmente amostras sólidas, determinando a concentração dos elementos, simultaneamente ou sequencialmente, sem a destruição da amostra, sem a necessidade de tratamentos químicos prévios. Um dos benefícios do uso da fluorescência de raios X para a análise química se encontra na sua adequabilidade para automação, preparação simplificada da amostra e rapidez na análise multielementar.

3.3 Análise de Carbono (C) da cinza leve

Para determinação do teor de Carbono, as amostras de cinza leve foram analisadas no Determinador CNH628 da marca LECO do Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão – LAEC / SATC como mostra a Figura 16.



Figura 16: Determinador de Carbono.

3.4 Distribuição granulométrica por cicloclassificador de partículas

Após a separação das partículas de cinza com a utilização de peneiras, utilizou-se o aparelho cicloclassificador a fim de obter com precisão o menor tamanho da partícula da cinza leve em um parâmetro de sub-peneiramento.

Esse processo facilitou a observação do comportamento das menores partículas de cinza leve. Na Figura 17 observa-se o equipamento cicloclassificador.



Figura 17: Granulômetro (Cicloclassificador CIMAQ)

3.5 Determinação do tamanho de partícula

As amostras dos pós utilizados foram analisadas no Centro de Microscopia da UFRGS através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca JEOL modelo 5800 com EDS acoplado, conforme mostra a Figura 18.



Figura 18: Microscópio eletrônico de varredura

Foram usados vários tamanhos de partículas da amostra de cinza-Fe, onde a granulometria se encontra entre 0,10 mm e 1 mm.

3.6 Preparação da amostra

Para a preparação da amostra, o pó elementar de ferro puro foi previamente processado em moinho atritor de alta energia em atmosfera de argônio e sem esferas, com rotação de 400 rpm por um tempo de 6 h. O moinho atritor utiliza com esferas de aço inox para fazer a mistura e homogeneizar o pó de cinza leve com o ferro puro. O moinho atritor utiliza álcool etílico para não oxidar as partículas. A segunda etapa ocorreu no moinho em “Y” para a adição do estearato de zinco (1,5% em peso), usado como lubrificante no composto processado. Depois de secas, as misturas a 50 °C em um forno utiliza-se o misturador em "Y" para adicionar o lubrificante.

3.7 Densidade Aparente

A densidade aparente de um pó é definida através da relação entre massa e volume em g/cm^3 ou, então, através da massa em (g) de uma unidade de volume de pó solto, sem aplicação de pressão alguma.

A importância de se ter tal conhecimento está no fato de se saber o verdadeiro volume ocupado por uma massa solta de pó. Por consequência, determina-se também, com o conhecimento de densidade a profundidade da cavidade da matriz e o comprimento necessário do curso da prensa para se compactar e densificar o pó.

Foram obtidos os valores de densidade aparente usando uma cavidade de matriz de 50,0 mm de altura (h), e diâmetro de 13,0 mm, completando-a com a mistura de pó solto, obtendo o volume fixo de $0,86 \text{ cm}^3$, sob um formato de cilíndrico. O método para o ensaio de densidade aparente não se baseou em normas específicas.

3.8 Compactação dos pós

As amostras foram compactadas em uma única etapa, por meio de uma matriz cilíndrica, para a obtenção de corpos de prova caracterizando, assim, o comportamento dos pós no decorrer do processo de confecção para a elaboração dos cermets. A forma cilíndrica das matrizes é indicada para confecção dos corpos de provas em função de análises posteriores.

Na compactação foi usada uma matriz cilíndrica de aço temperado para a compactação na prensa hidráulica de marca Eka de 400 kN de capacidade máxima. Para a compactação, o ferramental usado foi a matriz de 13,00 mm de diâmetro interno (\emptyset) e uma altura (h) de 50 mm em conjunto com o punção inferior de altura de 15 mm e punção superior de 60 mm de altura, conforme Figura 19.



Figura 19: Ferramental de compactação cilíndrica (vista geral)

A Figura 20 abaixo demonstra o desenho técnico do ferramental de compactação cilíndrica da Figura 20.

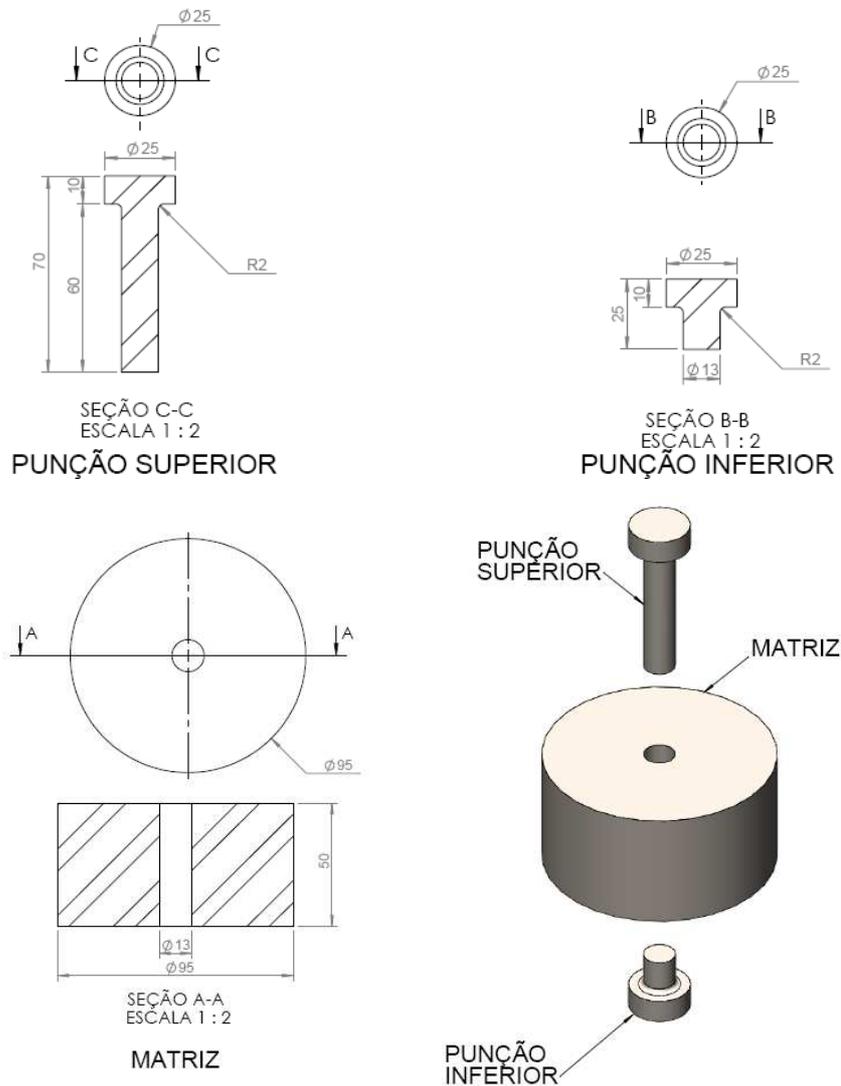


Figura 20: Desenho Técnico do Ferramental de compactação cilíndrica

3.9 Densidade a Verde

A densidade a verde trata-se da densidade da amostra apenas compactada.

Foram realizadas medições das massas dos corpos de provas compactados em balança de precisão e mensurados, por meio de um micrômetro, os diâmetros e as alturas, para assim realizar o cálculo de volume. Através da equação da densidade foi possível relacionar o volume e a massa obtida à densidade verde do compactado.

3.10 Sinterização

Na sinterização do cermet foi necessário forno com variações de temperaturas e atmosfera contendo 25% de hidrogênio e 75% de nitrogênio (gás marrom). As temperaturas utilizadas foram de 1150 °C, 1200 °C, 1250 °C e 1300 °C. Para a pesquisa foram feitas diversas sinterizações a fim de determinar o comportamento dos corpos de provas nas respectivas temperaturas.

A sinterização se deu em forno tubular elétrico de resistência de carbetto 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 1160 °C e taxa média de aquecimento de 10 °C/min conforme mostra a Figura 21, com utilização de atmosfera de sinterização contendo 25% Hidrogênio e 75% Nitrogênio (Gás Marrom). As amostras foram resfriadas ao forno. O patamar de 1160 °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, o que corresponde para ferro a 1160 °C.

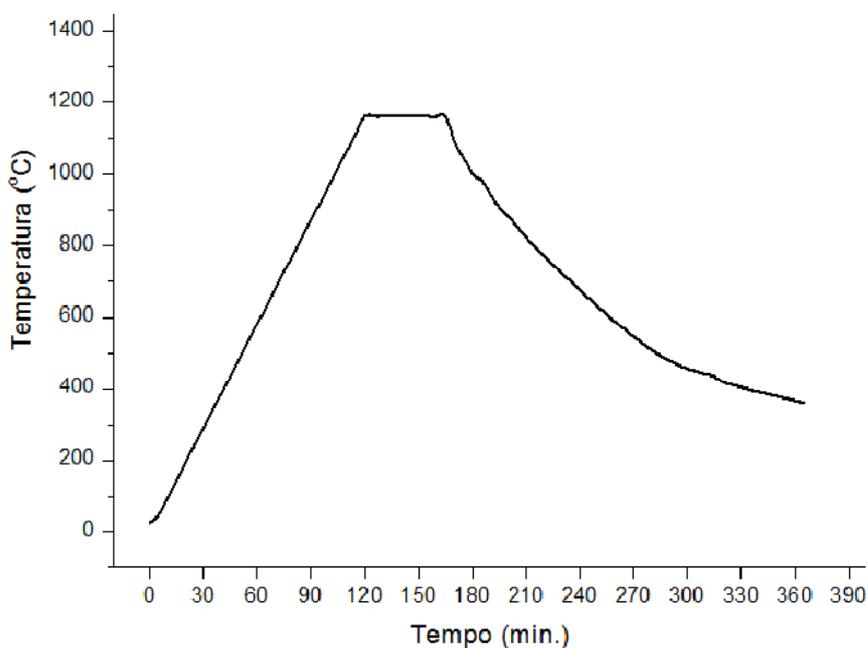


Figura 21: Curva de sinterização do ferro puro e cinza leve

3.11 Caracterizações das amostras sinterizadas

Diversos ensaios foram feitos a fim de determinar as características das amostras sinterizadas como densidade, contração linear e volumétrica, dureza e microdureza, microscopia ótica e eletrônica, análises via EDS e ensaio de compressão.

Na sequência, serão descritos os ensaios que caracterizam as amostras sinterizadas. A Figura 22 mostra o forno onde foram feitas as sinterizações.



Figura 22: Forno de sinterização

3.11.1 Densidade

Por meio do método de Arquimedes, determinou-se a densidade, que também é conhecida como massa específica, segundo a Norma MPIF-95, que tem como base no empuxo exercido sobre a amostra durante imersão em um recipiente com água acoplado a uma balança.

Antes de qualquer outra etapa, a massa seca é medida, e a mesma foi mensurada em uma balança analítica, a massa saturada é obtida após fervura das amostras em água a 100 °C durante 20 minutos para que ocorra absorção de água pela amostra em sua total capacidade e assim calcular o real volume deslocado, ou seja, sua real densidade conforme a Norma MPIF-95.

A massa imersa é a massa medida após a amostra estar saturada, descontando-se o empuxo. Através da determinação do volume da peça sinterizada determina-se a densidade e a contração volumétrica.

Sabendo que a densidade da cinza pura é de $0,75 \text{ g/cm}^3$ e que ela apresenta uma densidade inferior a 1 g/cm^3 , sendo essa a densidade da água. Contudo a cinza se encontra misturada ao ferro que, portanto, aumenta sua densidade.

Os diâmetros das amostras sinterizadas são mensurados com um micrômetro marca Mitutoyo de 0-25 mm, juntamente com a altura e determina-se a contração linear aproximada das peças.

3.11.2 Dureza e Microdureza

Foram usadas forças de 1000 gf sobre a superfície de ensaio do material para se medir as diagonais das indentações opticamente, que é o que determina o ensaio de microdureza da norma ASTM E 384 com resultado em Vickers.

A dureza Brinell dos corpos de prova sinterizados foi medida utilizando-se um duromêtro de bancada Wolpert com uma pré-carga de 100 N e carga de 1839,4 N, empregando-se um indentador esférico de 2,5 mm de diâmetro.

3.11.3 Microscopia ótica e eletrônica (MEV)

Ao realizar micrografia do sinterizado foi necessária a preparação e polimento metalográfico, que ocorreu inicialmente na retificação das amostras para amenizar a rugosidade superficial.

Na sequência houve o lixamento com lixa de sílica (SiO_2) com 200 mesh e posteriormente o polimento com pasta diamantada na ordem 50, 20, 10, 6, 4 e $1 \mu\text{m}$. As amostras foram observadas no microscópio ótico para que houvesse a avaliação da porosidade. Para a visualização das amostras no MEV, as mesmas foram metalizadas com carbono após o polimento metalográfico.

3.11.4 Análise via Detector de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)

Consiste em uma técnica utilizada na identificação da composição elementar de uma amostra ou pequena área de interessa na respectiva amostra.

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

4. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Com base nos ensaios realizados com as amostras de cinza leve e ferro, serão apresentados os resultados e discussão dos mesmos.

4.1 Caracterização da Cinza

A cinza leve foi caracterizada a partir dos ensaios: composição química por fluorescência de raio X, granulometria por cicloclassificador e micrografia. Os métodos de cada ensaio serão detalhados na sequência do texto.

4.1.1 Composição química por fluorescência de raio X

Utilizaram-se amostras de cinza leve geradas durante o processo de queima de carvão mineral da Usina Termelétrica Tractebel Energia S.A. Primeiramente, para a caracterização da cinza se determinou a composição elementar destes resíduos em espectrômetro por fluorescência de raios X, modelo Axios Advanced PANalytical, via análise por perda ao fogo efetuada a 1.050 °C por 1 hora. A amostra foi preparada por prensagem de pastilha. Os principais constituintes determinados foram: sílica, alumina e óxido de ferro. Esses correspondem praticamente à totalidade em peso dos componentes das cinzas, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Análise química em espectrômetro por fluorescência de raios X

Substâncias	Teor (% em massa)
SiO ₂	62,5
Al ₂ O ₃	23,8
Fe ₂ O ₃	5,3
K ₂ O	2,7
CaO	1,4
TiO ₂	1,2
Outros	3,1

Para quantificar o teor de carbono elementar na amostra de cinza leve realizou-se ensaio de detecção de carbono. O percentual de carbono da cinza leve analisada apresenta um valor de 0,98% de carbono.

Fazendo um comparativo entre a composição química feita nas amostras de cinzas de três tipos de carvão analisado por BAGATINI ET AL (2007) e a análise realizada por este estudo na amostra de cinza leve proveniente Usina Termelétrica Tractebel Energia S.A., observa-se extrema semelhança na constituição química, a qual é formada pelos mesmos óxidos.

Em ambos os trabalhos consegue-se observar que a sílica é o óxido de maior percentual, seguido da alumina, óxido férrico, de potássio e de titânio.

Comparando as Tabelas 2 e 3 com a Tabela 6 observa-se variações nos percentuais dos constituintes, contudo deve-se levar em consideração a procedência e o período em que as amostras foram analisadas.

4.1.2 Granulometria por peneira e cicloclassificador

Foi realizada a determinação de tamanho de partículas, por meio da granulometria em granulômetro (cicloclassificador CIMAQ) da cinza leve da Usina Termelétrica Tractebel Energia S.A através de um jogo de peneiras e por cicloclassificador.

O resultado da granulometria mostrou que a maior partícula analisada com tamanho de > 4 mm apresentou um percentual em massa de 5,16% e a menor partícula analisada com tamanho de $< 0,010$ mm apresentou um percentual em massa de 0,98% .

As amostras feitas por peneiras que variam de > 4 mm a 0,074 mm apresentaram uma variação granulométrica com grande variação, o que não se observa nas amostras feitas no cicloclassificador onde há pouca variação granulométrica.

O ensaio em cicloclassificador foi feito para determinar com precisão a granulometria das partículas de cinza não observada no ensaio com peneiras.

Pode-se observar na Figura 21 o gráfico da granulometria da cinza leve feita em peneira até o tamanho 0,74 mm e em cicloclassificador para tamanhos menores. Esta distribuição de tamanhos de partículas mostrou-se adequada para a obtenção de cermets, tendo em vista a análise dos demais ensaios e resultados. Os dados referentes à Figura 23 encontram-se no apêndice 1.

O percentual acumulado de partículas também é observado na Figura 23.

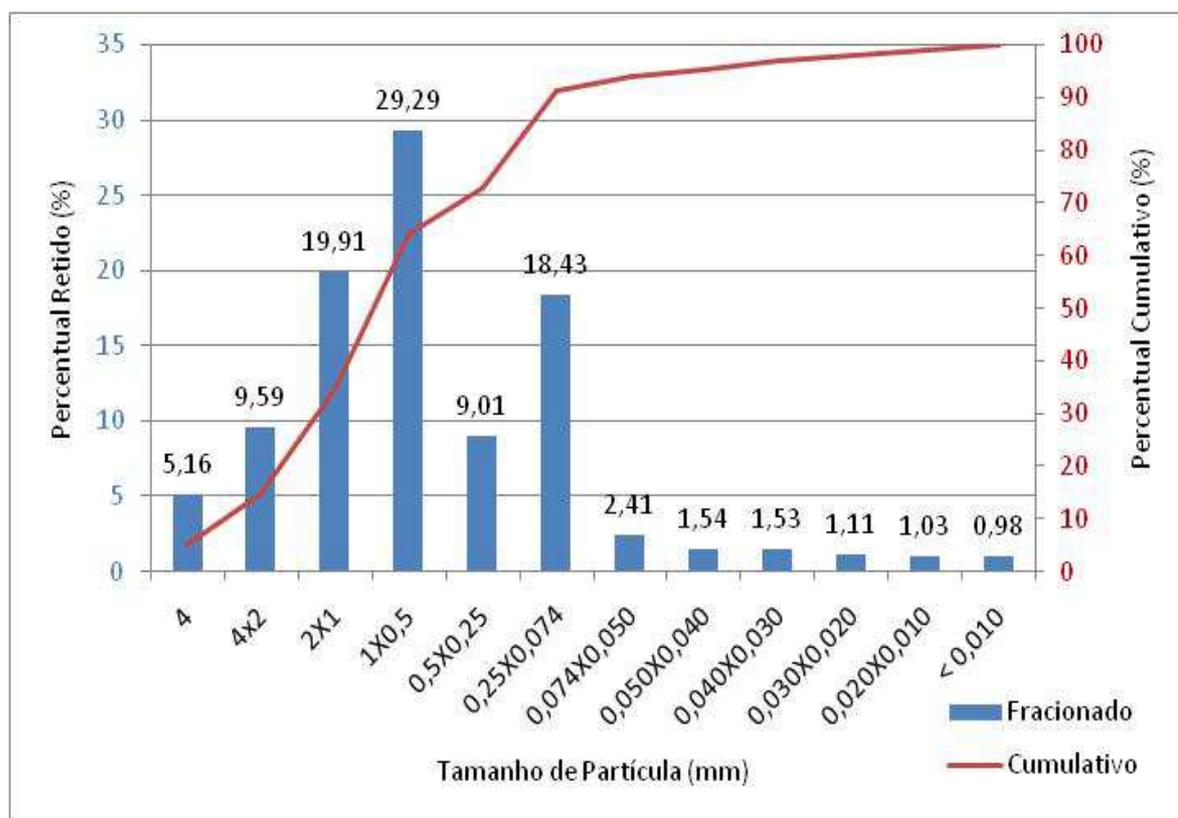


Figura 23: Granulometria da cinza leve em peneiras e via úmido em Granulômetro (Cicloclassificador Cimaq)

4.1.3 Micrografia da amostra de cinza leve e ferro puro

Para a caracterização morfológica da cinza composta pelos óxidos, foi utilizado microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol, modelo JMS 6060.

A distribuição granulométrica e o tamanho médio de partícula foram determinados por ensaio de difração de raio laser.

As partículas da cinza apresentam morfologia predominantemente esférica e de tamanho irregular, devido à composição da cinza, formada por óxidos de diferentes composições, conforme Figura 24.

A heterogeneidade granulométrica e de composição é o principal fator que controla as propriedades de densidade do sinterizado e a contração volumétrica.

Essas características também são controladas pelas diferentes temperaturas de formação de fase líquida dos óxidos presentes.

A figura 24 mostra a aparência das partículas de cinza leve por MEV.

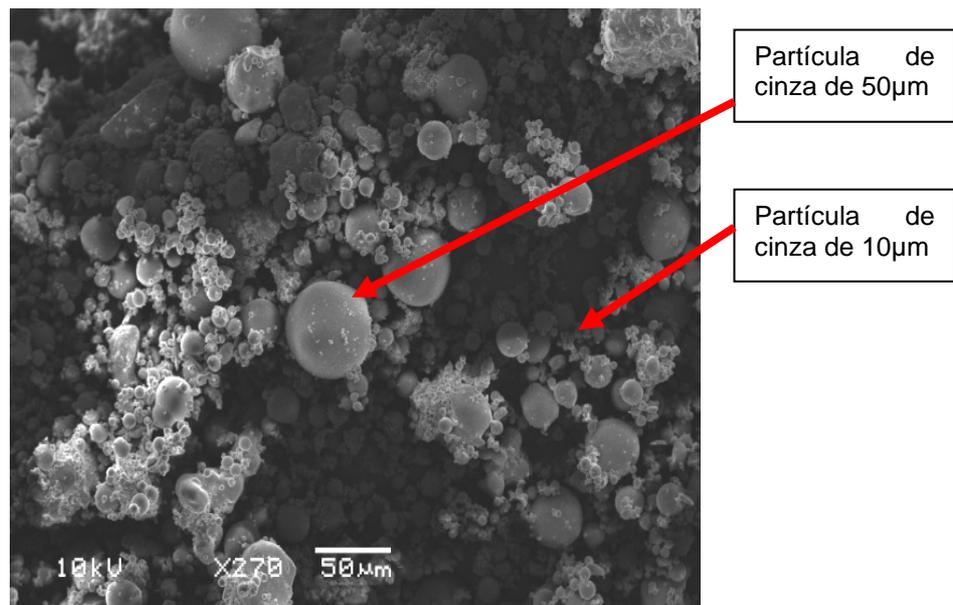


Figura 24: Micrografia do pó de cinza leve.

Enquanto as partículas de ferro puro moído apresentam morfologia achatada ou “flocos”, típico de partículas processadas por moagem de alta energia, o que favorece o aumento de densidade durante o processo de compactação. O tamanho médio das partículas de ferro é de aproximadamente 100 micrometro. Na Figura 25 observa-se a forma de flocos dos grãos de ferro puro por MEV.

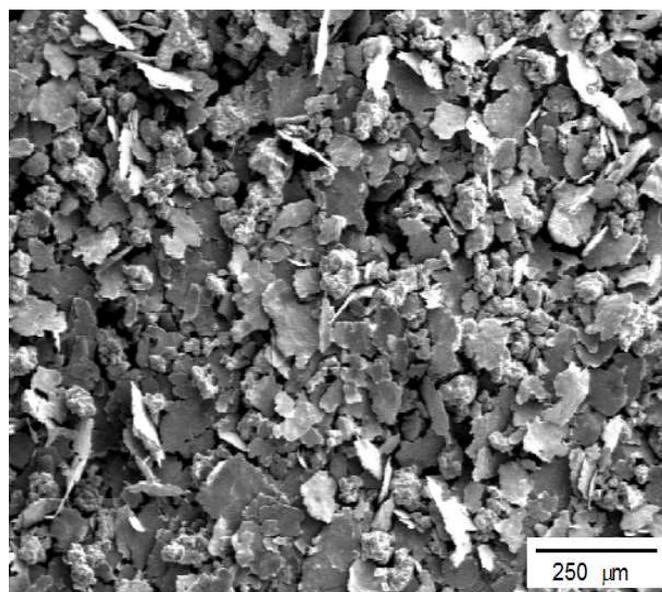


Figura 25: Micrografia amostra de ferro puro.

4.2 Compactação

Após a compactação foi calculado a densidade dos corpos de prova medindo sua massa em balança analítica e seu volume com o auxílio de paquímetro.

Na Tabela 7 são apresentados os valores obtidos de densidade a verde para as diversas pressões de compactação utilizadas para 5% de cinza.

A análise de tais percentuais de cinza foi feita para observar o comportamento da cinza. Foram feitas a análise de uma amostra por condição.

Tabela 7: Valores de densidade a verde – 5% de cinza.

Pressão (MPa)	Área (mm ²)	Massa (g)	Altura (mm)	Volume (cm ³)	Densidade a Verde (g/cm ³)
100	153,94	3,05	4,72	0,72	4,20
200	153,94	3,10	4,19	0,64	4,80
300	153,94	3,06	3,84	0,59	5,18
400	153,94	3,04	3,63	0,55	5,44
500	153,94	3,04	3,51	0,54	5,63
600	153,94	3,06	3,53	0,54	5,64
700	153,94	3,03	3,54	0,54	5,56
800	153,94	2,56	3,09	0,47	5,39

Observa-se que a densidade aumenta em função da pressão de compactação até pressão de 600 MPa, e posteriormente a densidade cai gradativamente.

A Tabela 8 mostra um aumento da densidade em função da pressão de compactação da cinza até 500 MPa

Após esta pressão os valores de densidade se mantêm estáveis até 800 MPa para 10% de cinza.

Tabela 8: Valores de densidade a verde – 10% de cinza.

Pressão (MPa)	Área (mm ²)	Massa (g)	Altura (mm)	Volume (cm ³)	Densidade a Verde (g/cm ³)
100	153,94	2,98	5,48	0,84	3,53
200	153,94	3,04	4,76	0,73	4,15
300	153,94	2,99	4,26	0,65	4,57
400	153,94	2,99	4,08	0,62	4,77
500	153,94	3,04	4,00	0,61	4,95
600	153,94	3,00	3,91	0,60	4,99
700	153,94	3,01	3,90	0,60	5,02
800	153,94	2,72	3,58	0,55	4,95

A Figura 26 demonstra um comparativo do comportamento das amostras de 5% e 10% de cinza da Tabela 7 e Tabela 8, quanto às suas densidades à verde nas pressões entre 100 e 800 MPa.

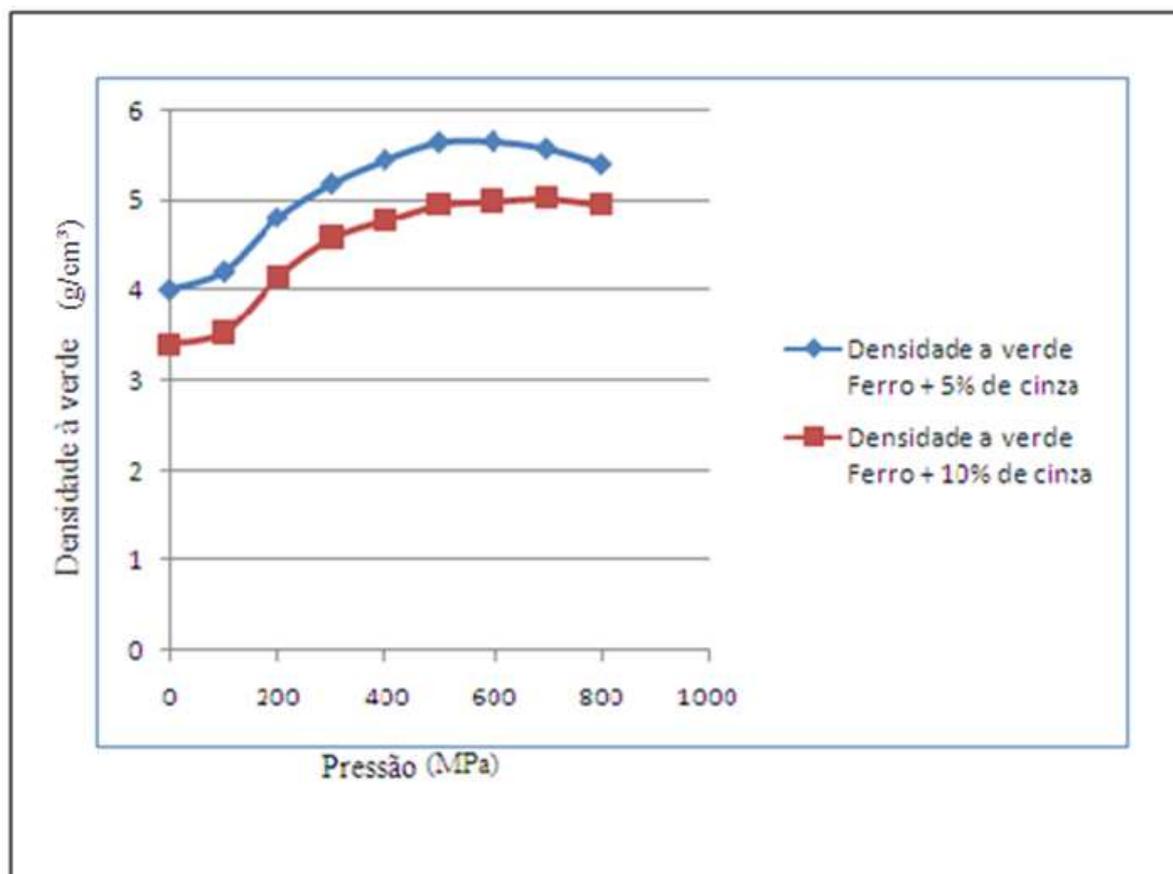


Figura 26: Diagrama Densidade X Pressão a verde das amostras de 5% e 10% de cinza compactadas.

Pode-se observar que o aumento da pressão tanto na amostra de 5% quanto na amostra de 10% de cinza provoca uma elevação na densidade a verde até a pressão de 600 MPa.

Na amostra de 5% de cinza sua densidade inicia a redução a partir de 700 MPa. Na amostra de 10% de cinza houve redução da densidade apenas na pressão de 800 MPa.

FIGUEREDO (1982) em seu trabalho mostra um aumento de densidade do compactado de seu cermet com o aumento percentual de óxido por ele usado.

A densidade do compactado da amostra contendo ferro mais 5% de cinza e ferro mais 10% de cinza demonstra que a redução do percentual de cinza, de 10% para 5% provoca aumento significativo da densidade, pois a densidade do ferro é maior.

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

4.3 Curva de Compressibilidade, Densidade e Sinterização

A densidade aparente foi feita com o pó solto (sem aplicação de pressão) da mistura contendo 80% de cinza leve e 20% de ferro em pressão zero, conforme Figura 27. As medidas de compressibilidade apresentaram aumento de densidade com o aumento da pressão, indicando uma boa densificação para ambas as misturas compostas de 5% e 10% de cinza.

4.3.1 Cermet 20% de Fe + 80% de Cinza

Foram preparadas quatro amostras misturando-se homogeneamente a cinza leve obtida da queima do carvão mineral com 20% de pó de ferro puro, já que nas composições contendo 5% e 10% de ferro as mesmas sofreram fratura. Foram feitas a análise de uma amostra em cada pressão. A mistura obtida foi compactada uniaxialmente em uma matriz cilíndrica de 13 mm de diâmetro. Conforme se observa na curva de compressibilidade da Figura 28, a pressão na qual a mistura compactou melhor, mostrando a densificação do material foi de 300 MPa. Após tal pressão se observa uma constância na densidade. A densidade a verde dos corpos de prova foi determinada pela medição dimensional e determinação da massa em balança analítica por meio do princípio de Arquimedes.

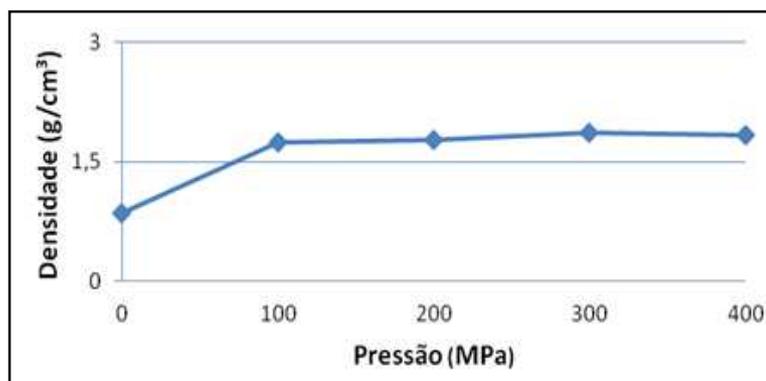


Figura 27: Curva de compressibilidade de 80% de cinza leve e 20% de ferro antes da sinterização.

Foram sinterizadas quatro amostras de 80% de cinza leve e 20% de ferro em temperaturas diferentes, que foram 1150 °C, 1200 °C, 1250 °C e 1300 °C. Durante a sinterização foi utilizada uma atmosfera contendo 25% hidrogênio e 75% nitrogênio (gás marrom). As amostras foram resfriadas ao forno. As densidades dos corpos de prova sinterizados foram medidas utilizando-se o princípio de Arquimedes.

4.3.2 Compósito a base de Fe

A sinterização das amostras se fez a um patamar de temperatura de 1160 °C e taxa média de aquecimento de 10 °C/min.

Para melhor análise dos resultados referentes às densidades a verde e do sinterizado, as mesmas foram plotadas nos gráficos apresentados nas Figuras 29, 30 e 31 que indicam que quanto menor o percentual de cinza, maior será a densidade alcançada para valores de pressão de compactação entre 100 e 800 MPa, a partir dos quais a densidade não apresenta variação significativa e apresenta os valores máximos. Para cada pressão no intervalo mencionado foram analisadas cinco amostras.

A Figura 28 apresenta a relação da densidade a verde e sinterizada da amostra contendo 95% de ferro e 5% de cinza em função da pressão de compactação, os dados utilizados para a confecção da tabela se encontram como apêndice 2.

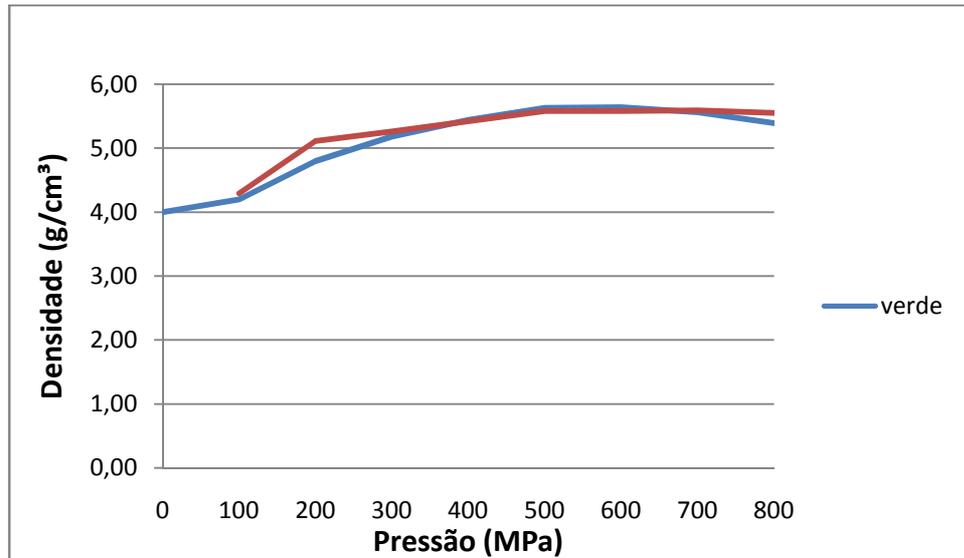


Figura 28: Densidade da amostra a verde e sinterizada contendo 95% de ferro e 5% de cinza em função da pressão de compactação.

A Figura 29 apresenta a relação da densidade a verde e sinterizada da amostra contendo 90% de ferro e 10% de cinza em função da pressão de compactação e seus dados se encontram no apêndice 3.

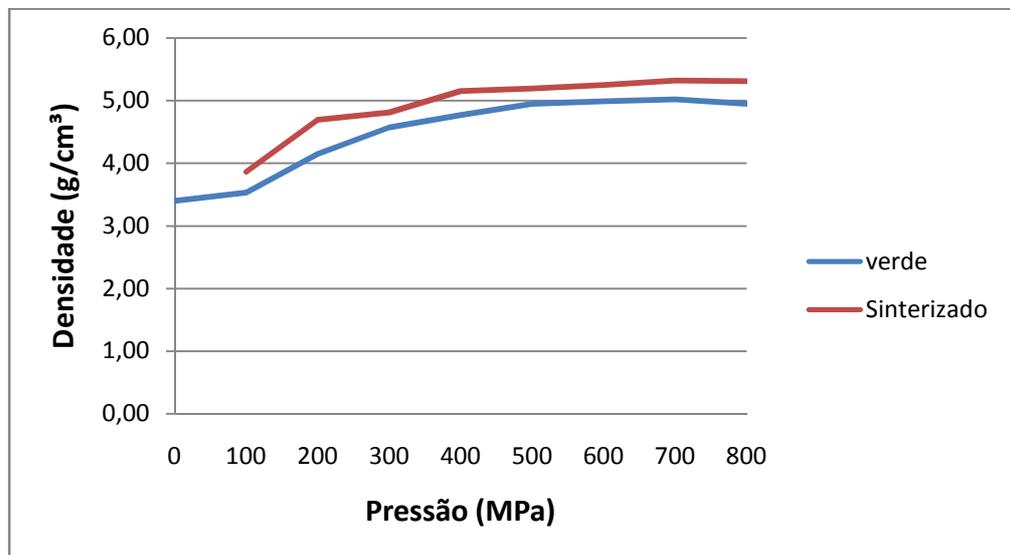


Figura 29: Densidade da amostra a verde e sinterizada contendo 90% de ferro e 10% de cinza em função da pressão de compactação.

A Figura 30 mostra a relação da densidade a verde e do sinterizado nas composições de 5% e 10% de cinza.

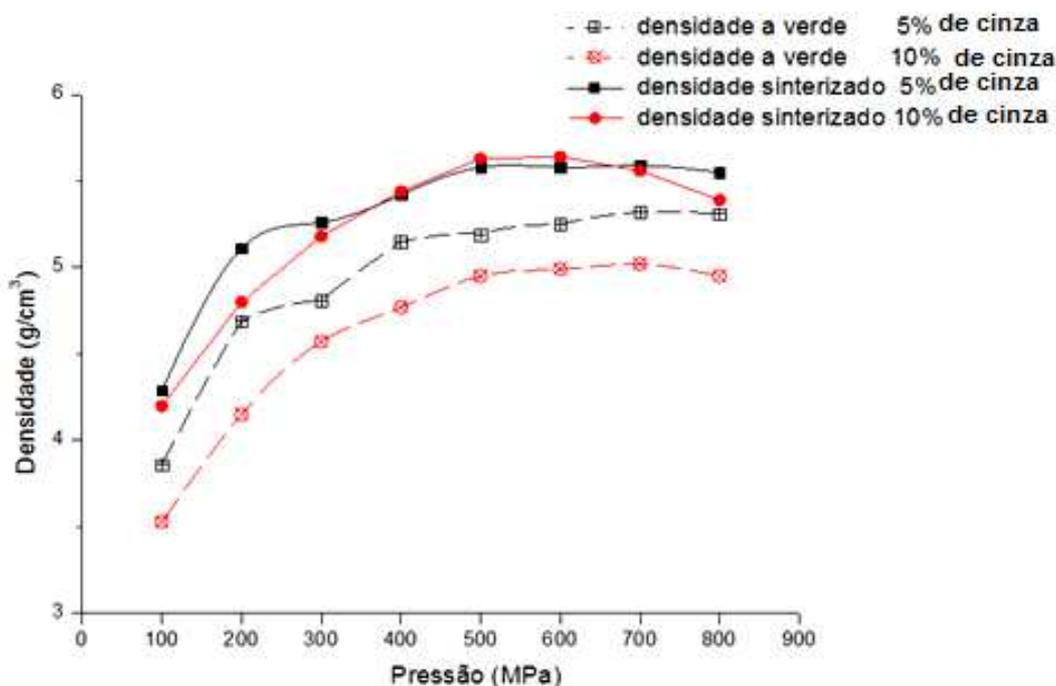


Figura 30: Densidade do cermet em função da pressão de compactação e de sinterização.

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

As amostras nas quais foi adicionado 5% de cinza apresentam maior densidade a verde do que as amostras contendo 10% desse componente.

Esses resultados se justificam pela baixa densidade da mistura de cinzas, de aproximadamente $0,75 \text{ g/cm}^3$, sendo esperado que o aumento do seu teor resulte em queda da densidade, tanto a verde quanto após sinterização.

A Figura 31 apresenta todos os resultados medidos e calculados das amostras compactadas com pressão utilizada de 300 MPa e sinterizadas a temperaturas de $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ à $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ contendo 20% de ferro.

A partir da temperatura inicial de sinterização obtida em função da fusão do ferro elevou-se essa temperatura até $1300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para confecção do gráfico representado na Figura 31 encontra-se em Tabela no apêndice 4.

Observa-se que quanto maior é a temperatura de sinterização menor é a densidade do sinterizado, pois o oxigênio ligado aos óxidos como a alumina e a sílica, constituinte da cinza, se desprende, dissipando-se na atmosfera, ocasionando redução de densidade.

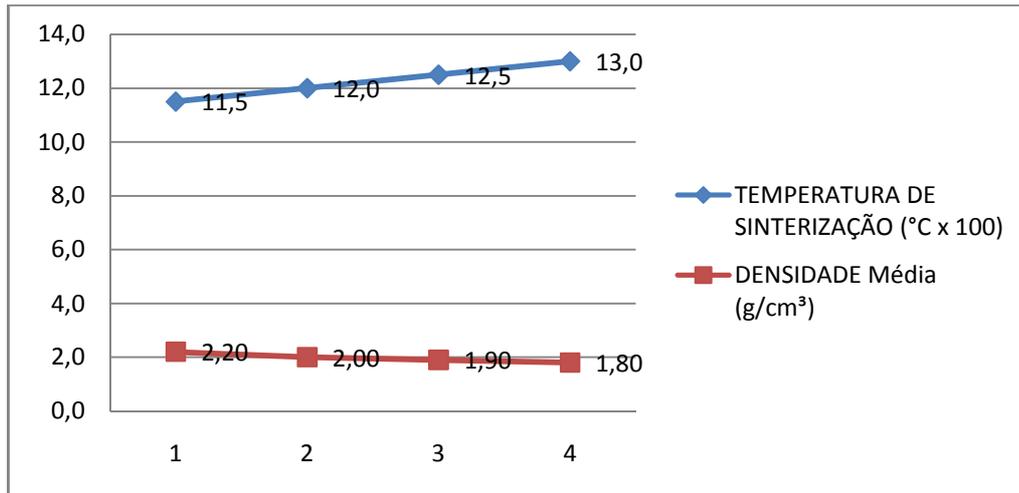


Figura 31: Densidade das amostras sinterizadas

Observa-se que quanto maior é a temperatura de sinterização menor é a densidade do sinterizado, pois o oxigênio ligado aos óxidos como a alumina e a sílica, constituinte da cinza, se desprende, dissipando-se na atmosfera, ocasionando redução de densidade.

4.4 Durezas e Microdurezas das amostras sinterizadas

A Figura 32 mostra a variação na dureza Brinell (HB) em função da pressão de compactação empregada para as amostras contendo 5 e 10% de cinza.

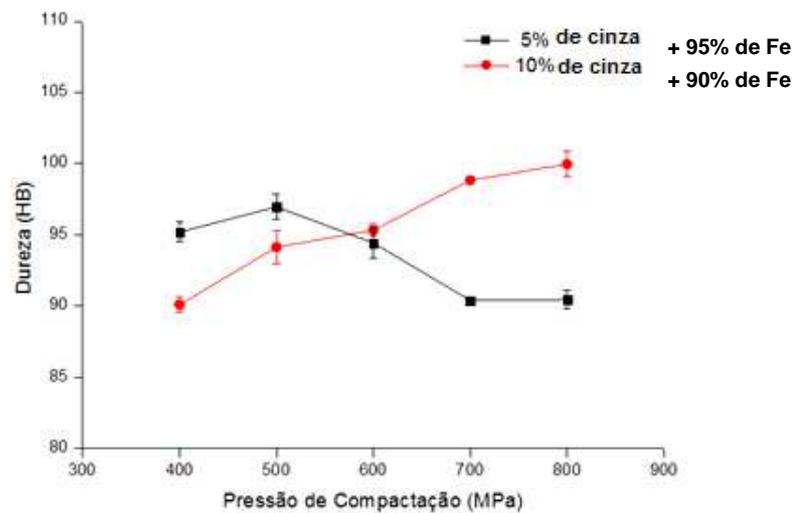


Figura 32: Variação na dureza Brinell (HB) em função da pressão de compactação depois de sinterizado a 1160°C.

Enquanto as amostras contendo 5% de cinza apresentam queda na dureza quando a pressão de compactação aumenta de 500 para 700 MPa, conforme é apresentado na Figura 32, as amostras contendo 10% de cinzas apresentam acréscimo na dureza para os mesmos valores de pressão. Uma possível explicação para este comportamento é a difusão de componentes provenientes das cinzas para a matriz metálica, servindo de reforço para a mesma, obtendo-se difusão proporcionalmente maior com o aumento no volume de partículas de cinza, sem ocorrências de fissuras. Essa afirmação pode ser embasada teoricamente pelos experimentos de Kerstner Et al. (2011).

As variações da dureza das amostras sinterizadas em função da pressão de compactação empregadas nas amostras a verde mostram que a dureza apresenta tendência a se manter constante para pressões de compactação acima de 700 MPa.

Na Tabela 09 podem-se ver os resultados obtidos das medições de microdureza a 300 MPa das amostras sinterizadas constituídas de 80% de cinza e 20% de ferro. Foram feitas seis medições em cada amostra devido a sua superfície muito heterôgenea. Percebe-se na amostra 1 o aumento gradativo na dureza conforme aumento de temperatura. Nas amostras 2, 3, 4 e 6 ocorre um aumento de dureza nas temperaturas de 1150 °C a 1250 °C diminuindo a dureza na temperatura de 1300 °C. Apenas na amostra 5 observou-se um aumento de dureza da temperatura 1150 °C para a temperatura de 1200 °C, ocorrendo uma redução de dureza na temperatura de 1250 °C e um posterior aumento de dureza quando a temperatura foi elevada à 1300 °C.

Tabela 09: Resultados da microdureza das amostras sinterizadas

MICRODUREZA DAS AMOSTRAS (HV) 300MPa				
Temperatura de sinterização	1150°C	1200°C	1250°C	1300°C
Amostras				
1	138,4	156,7	882,0	1032,7
2	130,6	626,8	858,1	832,5
3	88,0	742,8	1048,2	840,9
4	127,6	281,9	632,3	447,8
5	110,3	942,7	270,1	757,1
6	160,9	717,7	1105,8	879,0
Média	126,0	578,1	799,4	798,3

Na Figura 33 demonstra o desvio padrão da média das durezas em função do aumento de temperatura.

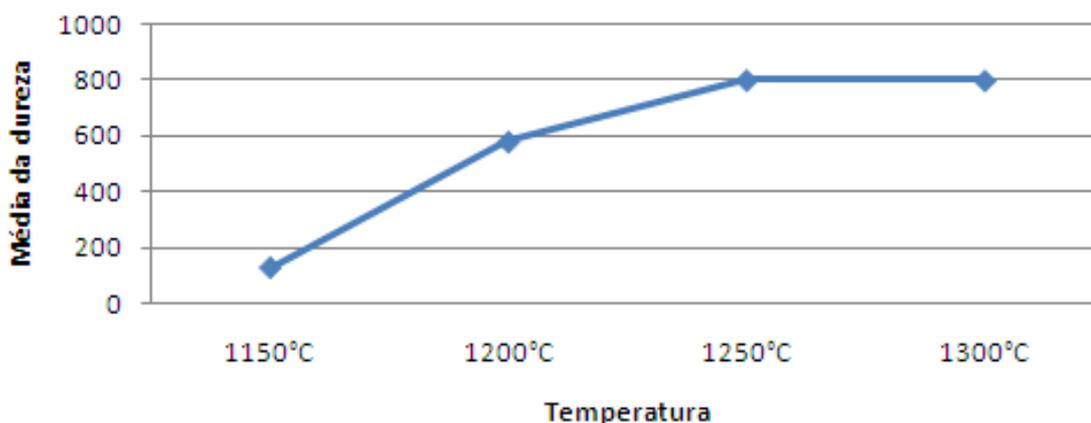


Figura 33: Microdureza das amostras (HV) em 300 MPa

4.5 Análises metalográficas das amostras contendo 95% de ferro com 5% de cinza e contendo 90% de ferro com 10% de cinza

A porosidade do compósito estudado foi caracterizada por meio de análise metalográfica.

As microestruturas mostradas pela Figura 34 evidenciam que o aumento do teor de cinza adicionada ao pó elementar de ferro puro causa aumento do volume de poros nas amostras sinterizadas.

Quando comparadas as micrografias das amostras fabricadas com pressão de compactação de 100 MPa (Figuras 34A e 34B) com as de 800 MPa, (Figuras 34C e 34D) percebe-se a diminuição no volume de poros nas amostras sob maior pressão.

Partindo dessa análise se obtém maiores densidades com o aumento da pressão de compactação empregada. Isso fica evidente comparando as Figuras 34B e 34D.

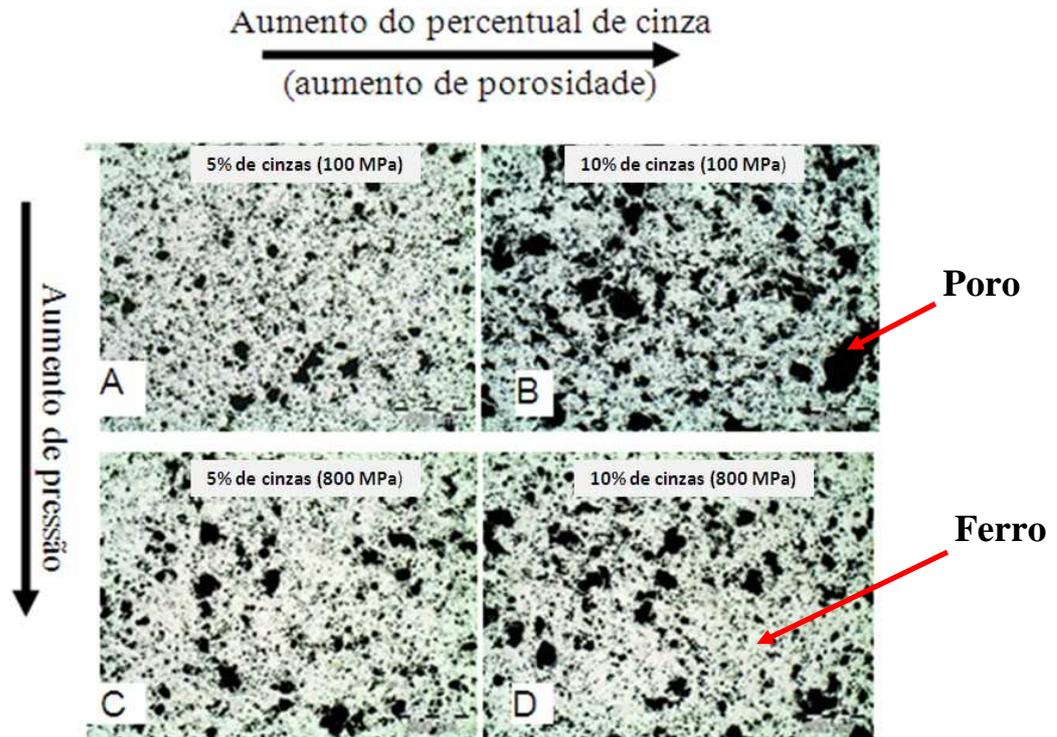


Figura 34: Metalografia das amostras contendo (A) 5% de cinzas (100 MPa), (B) 10% de cinzas (100 MPa), (C) 5% de cinzas (800 MPa), (D) 10% de cinzas (800 MPa), 100X.

As Figuras 35 e 36 apresentam as micrografias obtidas no MEV, onde são facilmente identificados pontos de difusão de material proveniente da cinza para a matriz metálica, indicados pelas setas. A seta branca (Figura 35) identifica a matriz metálica e a preta, as regiões onde ocorreu difusão de material proveniente das cinzas, em direção a matriz.

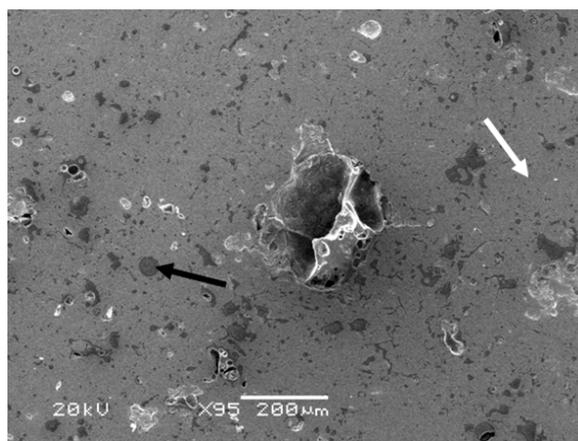


Figura 35: Micrografia da amostra sinterizada contendo 5% de cinza (95X).

A Figura 35, com aumento de 95X mostra ao centro da imagem, uma partícula de cinza de carvão com diversos pontos de difusão ao seu redor, cuja composição básica

mostrada pelo espectro de EDS da Figura 30. Já a Figura 36 com aumento de 1500X mostra ao centro uma partícula de cinza com difusão na interface partícula/matriz. Nesta imagem é possível observar que inúmeras partículas cerâmicas exibem no seu contorno uma estrutura diferente da matriz metálica e de cinza, pois esta região apresenta interação dos dois materiais deste compósito, como é apontado pelas setas.

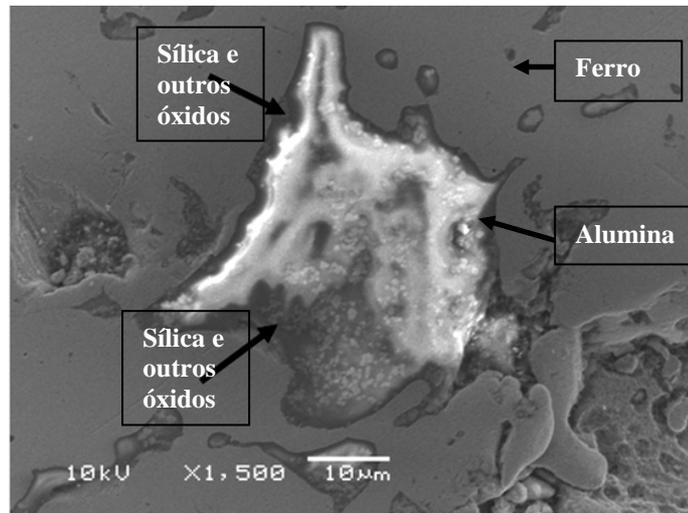


Figura 36: Micrografia da amostra sinterizada contendo 5% de cinza (1500X).

As Figuras 35 e 36 são referentes à mesma imagem, contudo, com visualização aumentada na Figura 36. Essa interação de material proveniente das partículas de cinzas difundido na matriz metálica apresentadas nas Figuras 35 e 36 justificam o aumento da dureza e conseqüentemente da resistência mecânica deste compósito.

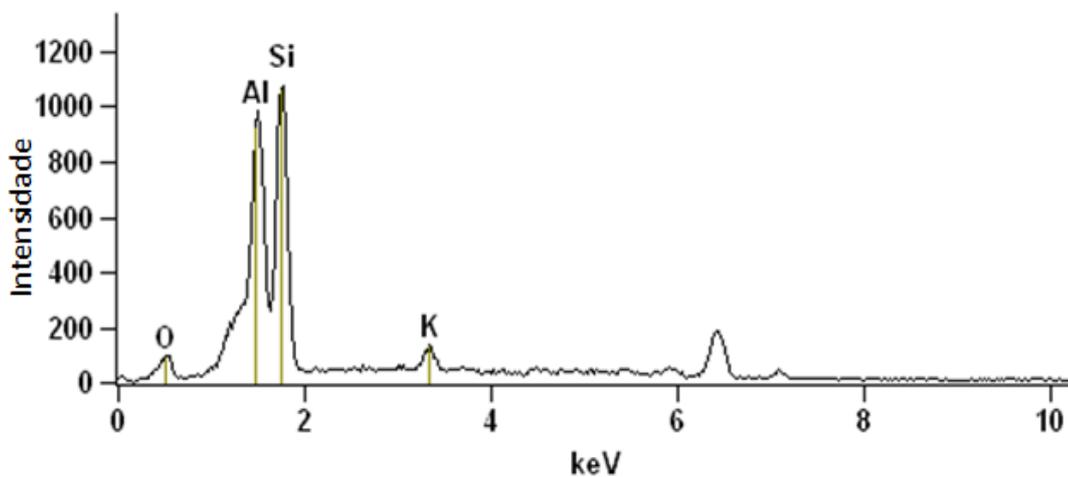


Figura 37: Espectro de EDS da região de difusão na borda das partículas de cinza.

A Figura 37 mostra o resultado da análise por EDS da região de difusão na borda da partícula de cinza, indicada pelas setas nas Figuras 35 e 36.

O pico mostrando a presença de silício e de alumínio confirma a ocorrência de difusão de elementos metálicos provenientes das cinzas em direção à matriz metálica.

Essa difusão, como já discutido, atua como reforço da matriz metálica, resultando em aumento da dureza.

Esta interação será estudada em trabalhos futuros para determinar o grau de difusividade (molhabilidade) das cinzas em uma matriz ferrosa.

As figuras 35 e 36 ressaltam a importância de novos estudos sobre o efeito do aumento de temperatura e do tempo de patamar de sinterização, objetivando um aumento significativo ou a total difusão de material proveniente das cinzas para a matriz metálica.

4.6 Análises Micrográfica do sinterizado

O ensaio de Micrografia analisou qualitativamente a porosidade do cermet de 20% Fe por meio do MEV.

A heterogeneidade da dureza é refletida na metalografia conforme se pode observar nas Figuras 38 a 41.

Na Figura 34 está exibida a estrutura da amostra sinterizada de cinza com 20% Fe processada a 1150 °C.

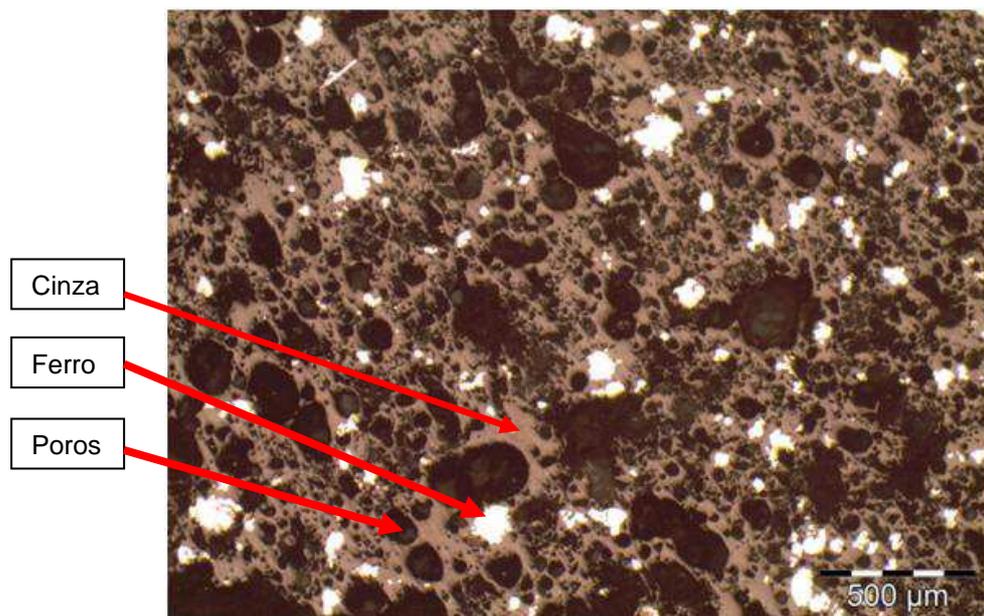


Figura 38: Micrografia do sinterizado a 1150°C com aumento de 50x.

A Figura 38 mostra os pontos brancos; sendo o ferro com tamanho de grão entre 50 e 100 μm com formato arredondado. Nota-se que não há difusão visível entre o ferro e a sílica ou entre o metal e a matriz cerâmica.

Pode-se observar que a distribuição dos materiais no cermets está homogênea sobre toda a área analisada. A Figura 39 apresenta a metalografia da amostra do sinterizado a 1200°C com aumento de 50x.

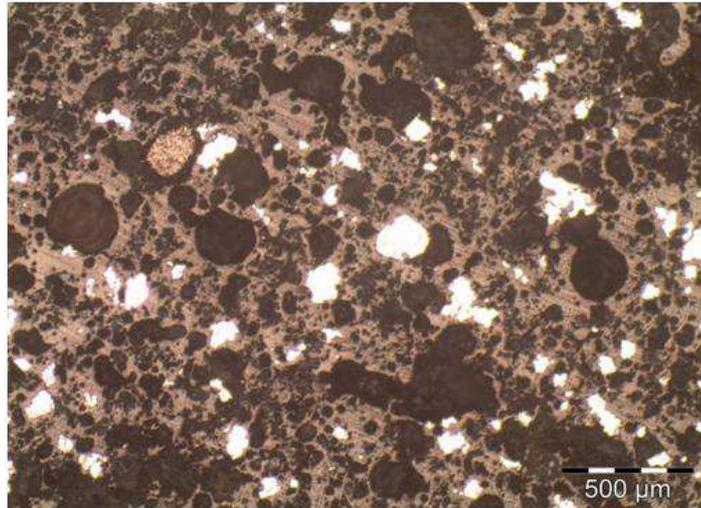


Figura 39: Metalografia do sinterizado a 1200°C com aumento de 50x.

A Figura 39 exibe a metalografia do cermet onde mostra o crescimento dos grãos de ferro em comparação com a amostra sinterizada em 1150 °C. A Figura 40 com 20% de ferro sinterizada a 1250 °C é na sequência apresentada. Observa-se nessa figura uma redução da porosidade e um aumento na sua densificação.

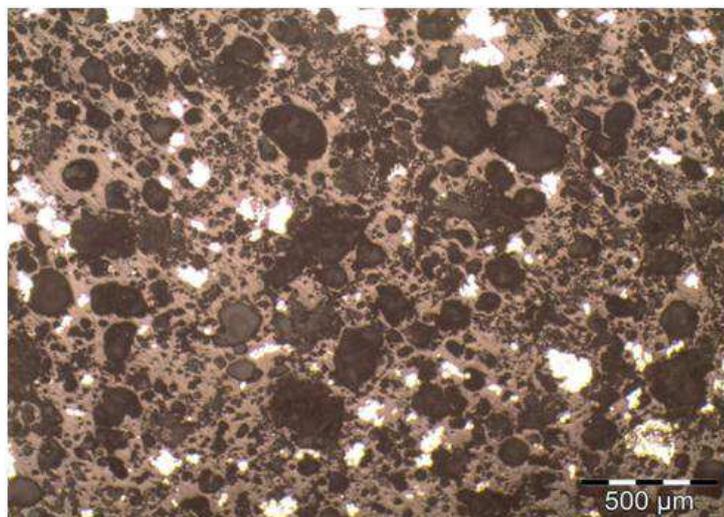


Figura 40: Metalografia do sinterizado a 1250°C com aumento de 50x.

Na Figura 41 pode-se observar o crescimento de grão de ferro, resultando em um tamanho entre 50 e 200 μm , podendo ser observado uma maior difusão entre os grãos. Nota-se que o aumento da temperatura na sinterização aumentou o tamanho de grão de sílica e sua difusão sobre o ferro observado na Figura 41 na cor cinza, comprovado por meio da análise de EDS.

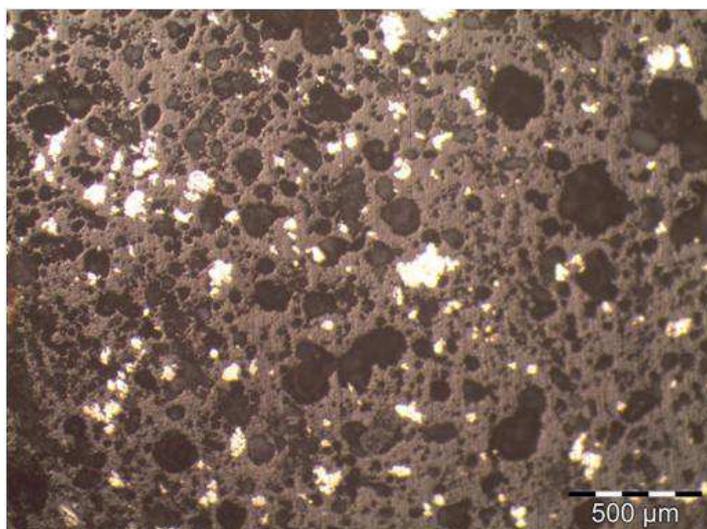


Figura 41: Metalografia do sinterizado a 1300°C com aumento de 50x.

Pode-se observar que os grãos da sílica estão mais arredondados com a temperatura de 1300 °C e menores pontos de difusão, comprovado por meio da análise de EDS conforme a Figura 32. A temperatura de sinterização influenciou diretamente na difusão da cerâmica sobre o metal. A sinterização com a temperatura mencionada neste parágrafo apresentou pouquíssima distorção dimensional.

Não foi realizada sinterização com a temperatura de 1350 °C devido à instabilidade na geometria da peça.

4.7 Ensaio de usinabilidade com a utilização do Cermet

Para a realização de ensaios de usinagem dos corpos de prova sinterizados neste trabalho, foi utilizado o torno convencional Nardini modelo Nodus 250, com faixa de rotação de 25 a 2000 rpm, conforme Figura 42. O material utilizado foi alumínio extrudado,

em forma de tarugos de 2 mm de diâmetro e comprimento de 500 mm, fixados na máquina entre placa e ponta.



Figura 42: Torno Convencional Nardini Modelo Nodus 250

Para a aplicação em testes de usinagem por torneamento foi desenvolvido um suporte de fixação chamado porta ferramenta conforme Figura 44.

Foram determinadas as aplicações nas condições de corte e avanço conforme Tabela 10 que determina a relação entre velocidade de corte e avanço da ferramenta em relação ao alumínio. Todos os testes realizados a seco, ou seja, sem a aplicação de fluídos cortes.

Tabela 10: Velocidade de corte e avanço da ferramenta em relação ao alumínio

Ensaio n°	V_c m/min (Velocidade)	f_n mm/rot (avanço por volta)	A_p mm (velocidade de corte)
1	160	0,1	0,5
2	160	0,05	0,5
3	80	0,1	0,5
4	80	0,05	0,5

Foram realizados testes com quatro réplicas para cada condição de corte com cermet contendo 20% de ferro, a fim de garantir confiabilidade nos ensaios realizados. Os valores representados na tabela 10 foram retirados de catálogos de fabricantes de ferramentas de aço rápido, para usinagem por torneamento em peças de alumínio.

A Figura 43 mostra os corpos de prova do cermet de cinza + 20% de ferro antes do ensaio de usinabilidade.

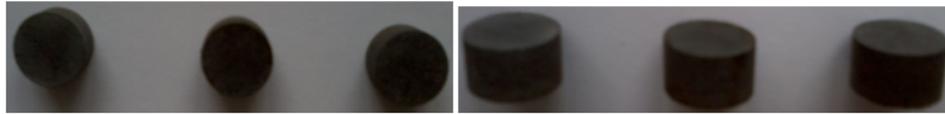


Figura 43: Corpos de prova da Ferramenta de Cermet (Cinza + 20 % Fe) antes da usinagem

Na Figura 44 pode-se observar imagens do porta ferramenta constituído de aço-carbono com um suporte para fixação do corpo de prova.



Figura 44: Porta Ferramenta

A Figura 45 representa a forma como foi fixado um dos corpos de prova na máquina e a fixação da peça utilizada como análise de usinabilidade.

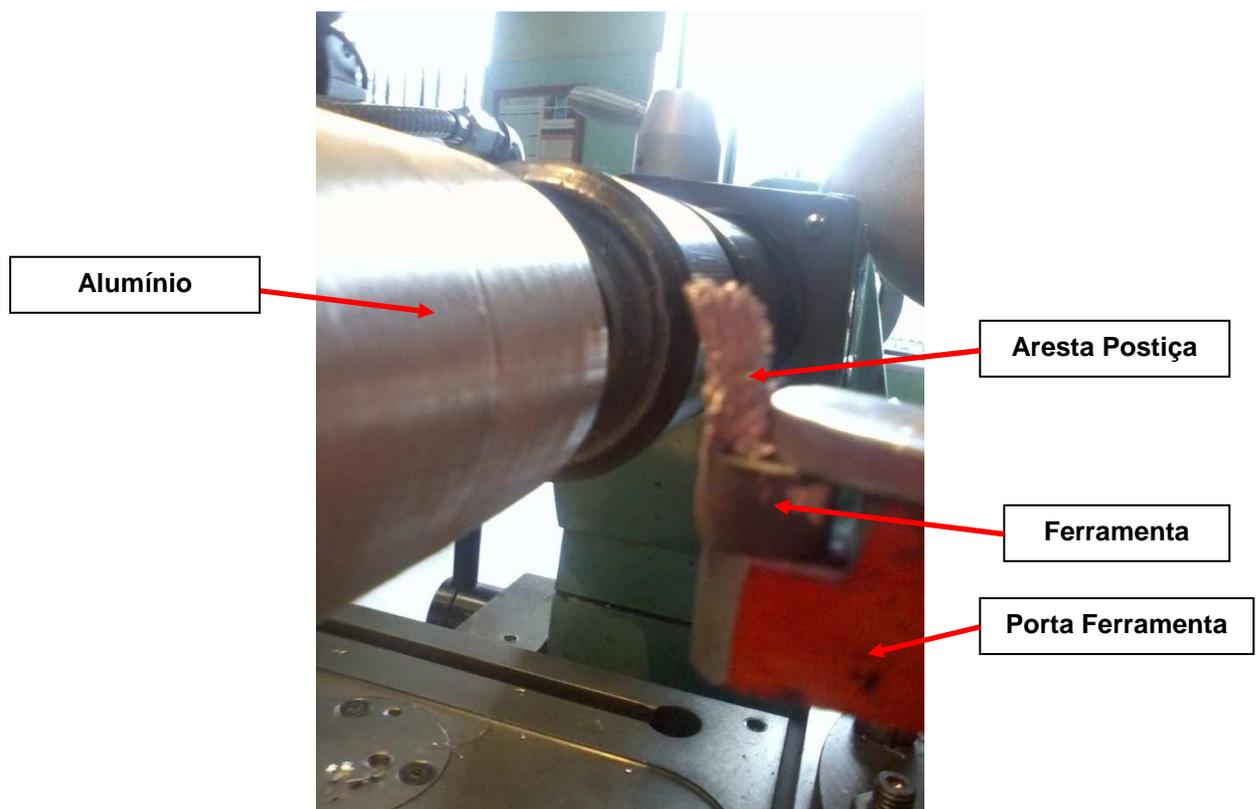


Figura 45: Execução do ensaio de usinagem

A Figura 46 mostra imagens do cermet após o ensaio de usinabilidade. Ocorreram lascamentos que se pode observar nas imagens dos corpos de prova depois do ensaio em alumínio.



Figura 46: Ferramentas de cermet quebradas após o ensaio de usinabilidade

Durante a realização dos testes de usinagem, resultados inexpressivos foram obtidos, em virtude de lascamentos nos inserts durante o processo de usinagem. Provavelmente os lascamentos foram oriundos da má compactação do composto cinza + ferro, pois pressões de corte foram insignificantes, tendo em vista que foi aplicada uma profundidade de corte muito baixa e uma velocidade de corte alta, em relação às convencionalmente aplicadas durante processos de usinagem convencionais.

5 CONCLUSÕES

O percentual de 5% e 10% de cinza sobre o de ferro garante acabamento e resistência a verde apropriada para amostras compactadas.

As curvas de compressibilidade indicam que não há necessidade de se utilizar uma pressão maior do que 700 MPa para a compactação das amostras com 5% e 10% de cinza.

O aumento da densidade com o aumento da pressão de compactação, indica uma boa densificação para as misturas com 5% e 10% de cinza.

O aumento do percentual de cinza resulta na queda da densidade tanto a verde quanto sinterizado em função da baixa densidade da cinza, de aproximadamente $0,75 \text{ g/cm}^3$.

O aumento do percentual de cinzas de 5% para 10% causa elevação da dureza para os mesmos valores de pressão de compactação, devido à difusão de material proveniente da cinza em direção a matriz metálica, servindo de reforço para a mesma.

A difusão do ferro em outro grão de mesma composição propicia o crescimento de grão na amostra de cinza com 20% de ferro.

Observa-se na mistura de cinza com 20% de ferro que o aumento da temperatura de sinterização diminui a densidade da mistura, mas aumenta a dureza indicando a difusão da matriz cerâmica no ferro.

A melhor temperatura de sinterização considerada para a mistura de cinza com 20% de Ferro é de $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ por apresentar pouquíssima distorção dimensional.

A temperatura de sinterização influenciou diretamente na difusão dos componentes da cinza sobre metal.

Necessita-se maior estudo das propriedades da cinza leve. Sendo muito importante conhecer o comportamento da alumina e da sílica durante a sinterização.

O estudo mostrou que a instabilidade das propriedades da cinza leve durante a sinterização é preocupante, pois não garante melhor propriedades físicas e mecânicas, devendo-se fazer um estudo para determinar o custo/benefício em relação as propriedades, o investimento na pesquisa e o retorno de capital.

Os resultados mostraram que é possível a obtenção de cermets a partir da cinza leve. E ainda comprovou um potencial para aplicação em materiais sinterizados de baixa densidade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de usinagem, em possíveis materiais compatíveis ao cermet produzido;
- Estudar aplicações deste cermet na indústria;
- Verificar possíveis processos de melhoria da rugosidade superficial dos materiais compactados e sinterizados;
- Estudar a microestrutura do compactado para análise de interstícios, que possam gerar problemas de aplicação do material;
- Analisar a mistura de cinza leve com outros metais, como o cobalto, o cobre e o níquel.
- Estudar o tempo de moagem da cinza + Fe em moinho de alta energia;
- Estudar melhoria da microestrutura do cermet;
- Analisar a procedência do carvão que dará origem as cinzas;
- Realizar análise de custos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ADRIANO, D. C., PAGE, A. L., ELSEEWI, A. A., CHANG, A. C., AND STRAUGHAN, I. **Utilization and disposal of fly ash and other residues in terrestrial ecosystems: A review.** *J. Environ.* 1980. Qual. 9, 333–344.

ASM HANDBOOK. **Power Metal technologies and Applications.** Volume 7. ASM Handbook Committee, 1998.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standards test methods for chemical, mass spectrometric and spectrochemical analysis of, and physical tests on beryllium oxide powder** . 80. (ASTM C 699-79). In: 1980 annual book of ASTM standards, part 45: Nuclear Standards.

BAGATINI, Maurício C.; GHIGGI, Maria L. F.; OSÓRIO, Eduardo.; VILELA, Antônio C. F.; CRUZ, Roberto.; DEFENDI, Guilherme. **Estudo da fusibilidade das cinzas de carvões em Função da composição química e mineralógica.** *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, v.3, n.4, p. 52-58, abr.-jun. 2007.

BALSHIN, M.Y. **Relation of mechanical properties of powder metals and their porosity and the ultimate properties of porous metal-ceramic materials.** *Doklady Akad. Sci. USSR.* p: 831-4, 1949 apud COPE, L.H. *The mechanical properties of nuclear cermets.* *Metallurgia Zi* 1968.

BORBA, Roberto Ferrari. **Carvão Mineral.** 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/carvao.pdf>> Acesso em 05 de agosto de 2012.

BORUVKA, L.; NEUMANN, A. W.; CHEM, J.. **Phys.** 1977. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acessado em: 15 de novembro de 2011.

BRITO, F. Iran Gomes.; MEDEIROS, Katarine F.; LOURENÇO, Jorge Magner. **Um estudo teórico sobre a sinterização na Metalurgia do Pó.** *Revista Holos*, ano 23, V. 3, 2007.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002.

CAMARA, Luiza. **Estudo do comportamento de materiais alternativos e Suas aplicações na engenharia geotécnica: aplicação de cinzas de carvão como condicionadores de solo.** 2011. Disponível em <www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2011/relatorios/ctc/civ/CIV-Luiza%20Camara.pdf>. Acesso em 20 de dezembro de 2012.

CASAGRANDE, J.; DALEFFE, A.; GRUBER, V.; CASTELAN, Jovani.; BROGNI, A.; SCHAEFFER, L. **Estudo das propriedades mecânicas de uma liga Ti-Nb sinterizada para aplicação na área biomédica.** 30º SENAFOR, 7º Encontro da Metalurgia do Pó, 1ª Conferência Internacional de Metalurgia do Pó. De 20 a 22 de outubro de 2010.

CHEESEMAN, C.R., VIRDI, G.S., **Properties and Microstructure of Lightweight Aggregate Produced from Sintered Sewage Sludge Ash**, Resources, Conservation and Recycling, 45, p. 18-30, Londres, 2005.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. São Paulo: MAKRON Books, 1986.

CHINELATTO, S. A. **Sinterização de pós ultra-finos de Alumina para obtenção de cerâmicas densa e com pequenos tamanhos de grãos**. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

DEPOI, F. S., POZEBON, D., KALKREUTH, W. D., **Caracterização de Carvões e suas Cinzas Provenientes da Região Sul do Brasil**, 25ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 2005.

DEPOI, F. S. **Desenvolvimento de métodos analíticos para a caracterização dos carvões brasileiros e suas cinzas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Química. Programa de Pós Graduação em Química, 2007.

DUNKLEY, J. MIM. **A global perspective. Powder Metallurgy**, v.43, n.4, 2000.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA): TURNER FEIRBANK HIGHWAY RESERCH CENTER. **User guidelines for waste and by-product material in pavement construction**. United States Department of Transport, 1998.

FIGUEREDO, Anacleto 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.

FIGUEIREDO, Samia Cordeiro. **Estudo exploratório de incorporação da Lama de Filtros Rotativos a Vácuo (LFRV), gerada na Millennium Inorganic Chemicals, em uma matriz Cerâmica Vermelha**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Ambiental, 2008.

GERMAN, R. M., **Liquid Phase Sintering**. Plenum Press, New York, 1985.

HIGASHI, Rafael Reis; LEANDRO, Rodrigo Pires; SANTOS, Glaci Trevisan; DIAS, Regina Davison. **Utilizações das cinzas pesadas provenientes da queima do Carvão mineral: aspectos tecnológicos e ambientais**. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 7ª edição. Dezembro de 2012. Disponível em <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>> Acesso em 15 de outubro de 2013.

IERVOLINO, F. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. Editora Metallum eventos técnicos e científicos. São Paulo, 2009.

IZIDORO, J. C., **Estudo sobre a remoção de íons metálicos em água usando zeólitas sintetizadas a partir das cinzas de carvão**, Dissertação de Mestrado, São Paulo, 2008.

KE, T. C. **Physical durability and electrical resistivity of Indiana bottom ash.** Indiana – USA: Purdue University West Lafayette, 1990.

KERSTNER, Estela Knopp.; MARIOT, Paulo.; MARTINS, Vinícius.; ANDO JUNIOR, Oswaldo.; BROGNI, Andreia.; SCHAEFFER, Lírio. **Estudo da Utilização de cinzas da combustão de carvão no processo de fabricação de componentes por Metalurgia do Pó Convencional.** Artigo. 66º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia. São Paulo, 2011.

KOCKAL, N. U.; OZTURAN, T. **Characteristics of lightweight fly ash aggregates produced with different binders and heat treatments.** Elsevier: Cement & Concrete Composites. Nº 33, 2011.

LEANDRO, R. P. **Utilização das cinzas pesadas provenientes da queima do carvão mineral em diques de contenção: aspectos técnicos e ambientais.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2002.

LEANDRO, R. P. **Estudo laboratorial acerca da possibilidade do aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis.** Dissertação de Mestrado. Orientador: Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri. São Carlos, 2005.

LEANDRO, R. P. FABBRI, G. T. P., **Aproveitamento da cinza pesada de carvão, mineral na construção de bases e sub-bases de pavimentos flexíveis.** P 1- 8 São Carlos, São Paulo, 2001.

LEVANDOWSKI, Janaina; KALKREUTH, Wolfgang. **Chemical and petrographic characterization of coal feed, ash and ash Figueira Power Plant, Paraná, Brazil** Elsevier: Cement & Concrete Composites. Nº 12, 2008.

LOVELL, C. W.; KE, T. C.; HUANG, W. H.; LOVELL, J. E. **Bottom ash as a highway material.** Transportation Research Record, nº 1310, 1992.

NARDI, J. V. (1988). **Cinza: uma alternativa na construção de pavimentos – noções gerais:** XXIII Reunião anual de Pavimentação, Florianópolis, Santa Catarina, 1998.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Processos de fabricação – Metalurgia do pó e o futuro da indústria.** Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007.

OLIVEIRA, P. V. **Aplicabilidade de resíduos e rejeitos ambientais para aproveitamento em pavimentação (caracterização física e química de misturas solo-cinza de carvão mineral),** 2011. Disponível em <www.pucrio.br/pibic/relatorio_resumo2011/relatorios/ctc/civ/civ-priscila%20oliveira.pdf> Acesso em 13 de dezembro de 2012.

ONDRACEK, G.; SPLICHAL, K. **Cermets in Zustands diagrammen** Ber. Dt. Keram. Ges., 48:343-54, 1971.

PETZOW, G.; CLAUSSEN, N. ; EXNER, H.E. **Structure and Properties of Cermets.** Argonne, XL., Argonne National Lab., 1968.

QUALISINTER. Disponível em: <www.qualisinter.com.br/Processo.htm> Acesso em: 10/05/2013

QUEROL, X., MORENO, N., UMANÃ, J. C., ALASTUEY, A., HERNANDÉZ, E., LÓPEZ-SOLER, A., PLANA, F. **Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview**. Int. Journal Coal Geol, v.50, 2002.

ROCHA, J. C.; JOHN, Vanderley M. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Coleção Habitare, V. 04. Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ANTAC, 2003.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M.; POZZOBOM, C.; MAIA, M. S.; MAGRI, L.; XAVIER S. M. T. **Reaproveitamento das cinzas pesadas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda na elaboração de materiais de construção: aspectos tecnológicos e ambientais: XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, Paraná, 2001.**

ROCHA, J. C. **Aproveitamento de cinzas volantes e pesadas para a produção de concreto usinados, blocos e pavimentos de concretos**. Relatório final do convênio GS – 15/99 – Gerasul, Aneel, Ufsc, Florianópolis, Santa Catarina, v. 1. 1999.

ROSS, P. S.; BECHER, J. **Colloid & Interface Sci.** 1992. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acessado em: 15 de novembro de 2011.

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

SILVA, M. V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de Carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água**. Dissertação, São Paulo, IPEN – Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, 2011.

SIQUEIRA, J. S. **Reciclagem de resíduos a partir da cinza de carvão mineral: Produção de argamassas**. Dissertação. Belém, Universidade Federal do Pará, 2011.

SOCO, E.; KALEMBKIEWCZ, J. **Investigations on Cr mobility from coal fly ash**. Elsevier: Cement & Concrete Composites. Nº 25, 2009.

SONG, M., S., GUO, B., GEERT, M., SCHUTTER, D., LI, X., **Effect of Shale Addition on Properties of Sintered Coal Fly Ash**, Construction and Building Materials, V. 25, 2011.

SOUZA, Milena Gouveia Oliveira de. **Utilização de nanopartículas de ferro na emediação de Águas subterrâneas contaminadas por compostos orgânicos**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SUNDSTRON, M. G. **Caracterização e avaliação das cinzas da combustão de Carvão mineral geradas na região do baixo Jacuí– RS**. Dissertação, Canoas – RS, UNILASALLE, 2012.

TRACTEBEL. 2012. Disponível em <portal.tractebelenergia.com.br> Acesso em 15 de novembro de 2011.

TURRER, Henrique Dias Gatti. **Utilização de poliacrilamidas de alto peso molecular na flotação catiônica reversa de minério de ferro.** 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.

USMEN, M. A.; HEAD, W. J.; MOULTON, L. K. **Use of coal-associated waste in low-volume roads.** Transport Research Record, nº 898, 1993.

Apêndice 2 – Valores de densidades do sinterizado– 5% de cinza.

Valores de densidade do sinterizado – 5% de cinza.

Pressão (MPa)	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade Sinterizado (g/cm ³)
100	2,96	0,69	4,29
200	3,06	0,59	5,11
300	3,02	0,57	5,26
400	3,00	0,55	5,42
500	3,00	0,53	5,58
600	3,02	0,54	5,58
700	2,99	0,53	5,59
800	2,53	0,45	5,55

Apêndice 3 – Valores de densidades do sinterizado– 10% de cinza.

Valores de densidade do sinterizado – 10% de cinza

Pressão (MPa)	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade Sinterizado (g/cm ³)
100	2,78	0,72	3,86
200	3,01	0,64	4,69
300	2,96	0,61	4,81
400	2,96	0,57	5,15
500	3,01	0,58	5,19
600	2,96	0,56	5,25
700	2,98	0,56	5,32
800	2,69	0,50	5,31

Apêndice 4: Densidade das amostras sinterizadas

Densidade das amostras sinterizadas

Condições	TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO (°C)	DENSIDADE Média (g/cm³)
1	1150	2,2
2	1200	2,0
3	1250	1,9
4	1300	1,8