

**Universidade Federal do Ceará  
Centro de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de  
Materiais**

**Halisson de Souza Pinheiro**

**PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PEÇAS CERÂMICAS  
OBTIDAS A PARTIR DO RESÍDUO DO GRANITO ASA BRANCA COM  
ADIÇÃO DE PRODUTOS DA COMBUSTÃO DO CARVÃO MINERAL**

**Fortaleza – Ce**

**2010**

**Halisson de Souza Pinheiro**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PEÇAS CERÂMICAS  
OBTIDAS A PARTIR DO RESÍDUO DO GRANITO ASA BRANCA COM  
ADIÇÃO DE PRODUTOS DA COMBUSTÃO DO CARVÃO MINERAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais.

Área de concentração: Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo E. F. Q. Nogueira

**Fortaleza – Ce**

**2010**

P719p Pinheiro, Halisson de Souza

Processamento e caracterização de peças cerâmicas obtidas a partir do resíduo do granito Asa Branca com adição de produtos da combustão do carvão mineral / Halisson de Souza Pinheiro, 2010.

72 f. ; il. ; enc.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Emilio Ferreira Quevedo Nogueira

Área de concentração: Propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2010.

1. Engenharia Metalúrgica. 2. Resíduos sólidos. 3. Cerâmica. I. Nogueira, Ricardo Emilio Ferreira Quevedo (orient.) II. Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós - Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais. III. Título.

CDD 669



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS**

**PARECER DA COMISSÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**HALISSON DE SOUZA PINHEIRO**

**“PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO GRANITO ASA  
BRANCA COM ADIÇÃO DE PRODUTOS DA COMBUSTÃO DO CARVÃO MINERAL”**

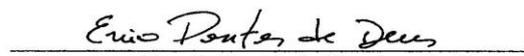
A Comissão de Dissertação composta pelos professores Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira, Presidente e Orientador, da Universidade Federal do Ceará; Enio Pontes de Deus, da Universidade Federal do Ceará e Divanira Ferreira Maia, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, considera o candidato:

Aprovado

Não Aprovado

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, em 06 de julho de 2010.

  
Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira  
Presidente e Orientador

  
Prof. Dr. Enio Pontes de Deus  
Membro

  
Profª. Drª. Divanira Ferreira Maia  
Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, criador do céu e da terra, por ter me dado força nesta dura caminhada.

Agradeço aos meus pais e a eles dedico esta vitória. E também aos meus irmãos Harlem e Herla, as minhas sobrinhas Hellen e Maria Luísa ,além do meu cunhado César e da minha cunhada Patricia.

Agradeço a minha noiva Bruna por sempre está comigo inclusive nos momentos difíceis desta árdua caminhada.

Aos amigos Emanuel, George, Erifraci, João Paulo, Wilson, Thiago e Romeu e Sombra.

Agradeço ao meu orientador Prof.Dr Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira, pela paciência e pelos conhecimentos repassados durante o curso.

Agradeço ao Prof.Dr Lindberg Lima Gonçalves pelo empenho e dedicação.

Agradeço aos amigos e colegas de curso de pós-graduação: Silvio, Demétrios, Erysandra, Daniel,Neumann, Zilma,Joelma,Éden, Emmanuelle e tantos outros.

*“Jesus é o único que cura sem deixar cicatriz”*

## RESUMO

Durante a queima do carvão mineral são gerados vários tipos de resíduos ou subprodutos (produtos da combustão do carvão, ou PCCs). Esses produtos incluem as cinzas volantes, as cinzas pesadas ou de fundo, a escória da caldeira, e o gesso do FGD - Flue Gas Desulfurization. Embora alguns PCCs sejam reutilizados como matéria-prima para a construção civil, a maioria deles é depositada em aterros ou represas de contenção. Além de ocupar vastas extensões de terra, existe uma grande preocupação com o fato de que produtos químicos tóxicos dos PCCs podem dissolver na água e essa água poluída pode lixiviar, contaminando tanto águas subterrâneas quanto superficiais. Este trabalho teve como objetivo fabricar e caracterizar peças cerâmicas a partir de resíduos da extração do granito Asa Branca, com adição de produtos gerados pela combustão do carvão de uma usina termoeletrica. Foram avaliadas a microestrutura e algumas propriedades físicas e mecânicas dessas peças. Os materiais utilizados foram granito Asa Branca e o subproduto da combustão do carvão mineral (fornecido pela Energia de Portugal – EDP), nas concentrações de 10%p, 20%p e 30%p. Para a caracterização das amostras foram utilizadas as técnicas de: *Difração de Raios-X*, *Fluorescência de Raios-X*, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Análise Termogravimétrica (ATG). Para a determinação das propriedades físicas foram realizados os ensaios de Contração Superficial e Mássica; Absorção de Água e Microdureza Vickers. Os resultados obtidos permitem concluir que o uso de produto da combustão do carvão mineral como reforço em peças feitas com pó de Granito Asa Branca é tecnicamente viável.

**Palavras-chaves:** Granito, resíduos, produtos da combustão do carvão mineral, cerâmicas.

## ABSTRACT

During the burning of mineral coal a series of different residues or byproducts (coal combustion products, or CCPs) are generated. These byproducts include fly ash, bottom ash, boiler slag, and flue gas desulfurization gypsum. Although some types of CCPs can be used as alternative raw materials for construction products, the majority of them are deposited in landfills or surface impoundments. Besides the occupation of large areas there is a major concern with the fact that toxic chemicals from the CCPs can dissolve in water, and this polluted water can spread underground, contaminating both groundwater and surface waters. The present work investigated the fabrication and characterization of ceramic products made from Asa Branca granite powder with the addition of products generated by the combustion of mineral coal in a power plant. The microstructure and some physical and mechanical properties of these parts were evaluated. The materials used were Asa Branca Granite and a mixture of CCPs supplied by EDP (Energia de Portugal) which were added in the concentrations of 10, 20 and 30% wt. to the granite matrix. The following techniques were used for the characterization of the materials: X-ray diffraction, X-ray fluorescence, Scanning Electron Microscopy (SEM), Thermogravimetric Analysis (TGA). Determination of physical properties was performed by means of Surface Contraction and Weight Loss tests; Water Absorption and Vickers Microhardness. The results showed that the use of products generated by the combustion of coal as reinforcements for the parts made from Asa Branca Granite powder is technically viable.

**Keywords:** Granite, residues, coal combustion products, ceramics.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1. Justificativa.....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1 Reciclagem.....	15
2.2 Carvão mineral.....	16
2.3 Cinzas do carvão mineral.....	21
2.4 Processos de obtenção de cinzas leves e pesadas.....	24
2.5 Granito.....	26
2.6 Produtos gerados pela combustão do carvão mineral.....	28
2.7 Aplicações das cinzas do carvão mineral.....	28
2.8 Cerâmicas.....	30
2.8.1 Aplicações das cerâmicas.....	31
2.8.2 Processamento das cerâmicas.....	32
2.8.2.1 Moagem.....	32
2.8.2.2 Peneiramento.....	34
2.8.2.3 Conformação.....	34
2.8.2.4 Sinterização (queima).....	35
2.8.2.4.1 Sinterização por fase líquida.....	38
2.9 Caracterização das cerâmicas.....	39
2.9.1 Difração de raio-x.....	39
2.9.2 Fluorescência de raio-x.....	39
2.9.3 Microscopia Eletrônica de Varredura(MEV).....	40
2.9.4 Análise Termogravimétrica(ATG).....	40
<b>3. MATERIAL E METODOS.....</b>	<b>41</b>
3.1 Matéria.....	41
3.2 Métodos.....	41
3.2.1. Seleção do material.....	42
3.2.2. Moagem.....	42
3.2.3 Mistura.....	42
3.2.4. Compactação (conformação).....	43
3.2.5. Sinterização.....	43
3.3 Caracterização do Material.....	44

3.3.1 Difração de Raios-X.....	45
3.3.2 Fluorescência de Raios-X.....	45
3.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	45
3.3.4 Análise Termogravimétrica.....	46
3.4 Determinação das Propriedades Físicas .....	46
3.4.1 Contração superficial e mássica.....	46
3.4.2 Absorção de água.....	47
3.4.3 Dureza.....	48
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>49</b>
4.1 Caracterização do Material.....	49
4.1.1 Fluorescência de Raios-x.....	49
4.1.2 Difração de Raio-X.....	51
4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	54
4.1.4 Análise Termogravimétrica.....	56
4.2 Determinação das Propriedades Físicas .....	61
4.2.1 Contração mássica.....	61
4.2.2 Contração superficial.....	62
4.2.3 Absorção de água.....	63
4.2.4 Microdureza Vickers.....	64
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>65</b>
5.1. Sugestões para futuros trabalhos.....	66
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 01.</b> Carvão.....	17
<b>FIGURA 02.</b> Formação do carvão mineral.....	19
<b>FIGURA 03.</b> Esquema de produção de energia e geração de cinzas.....	25
<b>FIGURA 04.</b> Classificação dos Materiais Cerâmicos.....	31
<b>FIGURA 05.</b> Vista principal e lateral do moinho de bolas.....	33
<b>FIGURA 06.</b> Estágios da compactação: (a) Enchimento; (b) Fechamento;(c) Prensagem; (d) Ejeção.....	35
<b>FIGURA 07.</b> Etapas do processo de sinterização: a) Partículas de pó; b) Estágio inicial; c) Estagio intermediário; d) Estágio final.....	38
<b>FIGURA 08.</b> Processo de fabricação dos corpos de provas.....	41
<b>FIGURA 09.</b> Molde para a produção da Cerâmica.....	43
<b>FIGURA 10.</b> Fluorescência de Raios-X/Rigaku (ZSX Mini II).....	45
<b>FIGURA 11.</b> MEV Philips XL30 Séries.....	46
<b>FIGURA 12.</b> Microdurômetro Shimadzu HMV.....	48
<b>FIGURA13.</b> Difração dos produtos sólidos da combustão do carvão mineral.....	51
<b>FIGURA 14.</b> Difração de raio-x –GAB10(1150°C).....	52
<b>FIGURA 15.</b> Difração de raio-x –GAB 10 (1170°C).....	53
<b>FIGURA 16.</b> Difração de raio –x- GAB 20 (1150°C).....	53
<b>FIGURA 17.</b> GAB 10 sinterizado a 1150°C.....	54
<b>FIGURA 18.</b> GAB 20 sinterizado a 1150°C. ....	55
<b>FIGURA 19.</b> GAB 10 sinterizado a 1170°C.....	55
<b>FIGURA 20.</b> GAB 20 sinterizado a 1170°C.....	56
<b>FIGURA 21.</b> ATG do Granito puro.....	57
<b>FIGURA 22.</b> ATG do produtos do carvão mineral.....	58
<b>FIGURA 23 -</b> ATG do GAB 10.....	59
<b>FIGURA 24 -</b> ATG do GAB 20.....	60

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 01.</b> Componentes dos tipos de carvão mineral (percentual).....	18
<b>TABELA 02</b> Maiores produtores mundiais de carvão mineral.....	20
<b>TABELA 03.</b> Análise química média das cinzas volantes de uma termelétrica do Rio Grande do Sul- RS.....	23
<b>TABELA 04.</b> Propriedades do granito Asa Branca.....	27
<b>TABELA 05.</b> Análise quantitativa do Granito por difratometria de pó.....	28
<b>TABELA 06.</b> Amostras sinterizadas.....	44
<b>TABELA 07.</b> Composição química do Granito Asa Branca .....	49
<b>TABELA 08.</b> Composição química dos resíduos da combustão do carvão mineral.....	50
<b>TABELA 09.</b> Resultado de contração mássica.....	61
<b>TABELA 10.</b> Resultado da contração linear.....	62
<b>TABELA 11.</b> Resultado da Absorção de água.....	63
<b>TABELA 12.</b> Resultado da Microdureza Vickers.....	64

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

(RCRA) - Resource Conservation and Recovering Act

%p - porcentagem em peso

MPa – Mega Pascal

MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura

DRX- Difração de raio-x

ATG - Análise Termogravimétrica

NUTEC - Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará

µm- micrometro

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

LACAM - Laboratório de Caracterização de Materiais

mN – micro – Newtons

$2\theta$  – ângulo de incidência dos Raios-X

$d_o$  - diâmetro da peça verde

$d_s$  - diâmetro da peça após a sinterização

$m_0$ - massa da peça verde

$m_s$ - massa da peça após a sinterização

A - massa do corpo-de-prova seco

B - massa do corpo-de-prova úmido (saturado)

PCC- produto da combustão do carvão

EDP- energia de Portugal

## 1. INTRODUÇÃO

---

O aproveitamento de resíduos das mais diversas atividades industriais é reconhecidamente indispensável para a preservação do meio ambiente, e vem se tornando uma atividade lucrativa, contribuindo, muitas vezes, para a redução de custos de certos materiais. Com o aumento da industrialização, advento de novas tecnologias e o aumento populacional, além de outros fatores, os resíduos se transformaram em graves problemas ambientais.

A quantidade e o número de tipos de resíduos, rejeitos e dejetos resultantes das mais diversas atividades humanas têm crescido de forma assustadora, exigindo cada vez mais cuidados especiais com a disposição dos mesmos.

O crescimento industrial sem precedentes, verificado nas últimas décadas, também trouxe um aumento no consumo de energia ocasionado pelo aumento da produção. Uma alternativa para acompanhar esse consumo de energia são as termoelétricas a carvão, fontes de energia muito utilizadas no mundo. As termoelétricas são geradoras de resíduos não só na forma de gases, como também de resíduos sólidos, através das cinzas do carvão originadas através de sua queima.

No Brasil, a preocupação com os resíduos é relativamente recente, ao contrário de outros países onde já existem políticas bastante definidas e eficientes no que diz respeito a reciclagem. Nos Estados Unidos a política de reciclagem de resíduos já existe desde 1960 e é chamada *Resource Conservation and Recovering Act* (RCRA), que pode ser traduzida como *Lei de Conservação e Reciclagem de Recursos* (JOHN e AGOPYAN, 2000)

Daí surge o seguinte questionamento: O que fazer com a grande quantidade de resíduos despejados pelas indústrias no Meio Ambiente? A reciclagem é uma das melhores soluções para esse problema, pois além de gerar uma grande economia para o país, é uma grande alternativa para a diminuição do resíduo (SANTOS, 2003).

Um ponto importante que deve se tomar conhecimento é a diferença entre lixo e resíduo. Segundo Santiago Jr (2008) resíduo é tudo aquilo que é

descartado em qualquer processo produtivo, que ainda possui algum valor ou pode se aplicado em outra função. Diferentemente de lixo, que após ser rejeitado não tem nenhum valor e não pode ser empregado em nenhuma função.

Durante a queima do carvão mineral em usinas termoeletricas, são gerados vários tipos de resíduos ou subprodutos (produtos da combustão do carvão, ou PCCs). Esses produtos incluem as cinzas volantes, as cinzas pesadas ou de fundo, a escória da caldeira, e o gesso do FGD.

Atualmente, tais materiais têm sido alvo de muitos estudos, por conter cinzas, além do fato de apresentarem diversas aplicações tecnológicas. Sua composição química é semelhante à de alguns materiais cerâmicos. Por esse motivo, algumas das principais aplicações têm sido na fabricação de diversos tipos de peças cerâmicas e, principalmente, como materiais para a construção civil.

Trabalho recente desenvolvido no Laboratório de Desenvolvimento de Materiais da Universidade Federal do Ceará utilizando resíduos de granito com a adição de cinzas de carvão vegetal verificou a ocorrência de uma diminuição na temperatura de sinterização, evidenciada pela vitrificação, sendo viável do ponto de vista energético.

No âmbito mundial, apesar dos impactos sobre o meio ambiente, o carvão é uma importante fonte de energia, sendo responsável por 39,1% de toda a energia elétrica gerada. As principais razões para isso são as seguintes: abundância das reservas; distribuição geográfica das reservas; baixos custos e estabilidade nos preços, relativamente a outros combustíveis.

Segundo o relatório da ANEEL, embora fontes renováveis, como biomassa, solar e eólica, venham a ocupar maior parcela na matriz energética mundial, o carvão deverá continuar sendo, por muitas décadas, o principal insumo para a geração de energia elétrica, especialmente nos países em desenvolvimento (CARVÃO MINERAL, 2003).

O objetivo deste trabalho de cunho científico foi estudar a viabilidade da adição dos produtos sólidos da combustão do carvão mineral como carga em peças cerâmicas fabricadas a partir de resíduos de granito. As peças de granito

Asa Branca foram confeccionadas com concentrações diferentes de carvão mineral (10%p, 20%p e 30%p). Foram também avaliadas as propriedades físicas desse material para verificar o efeito da adição dos produtos da combustão do carvão mineral.

### **1.1. Justificativa**

O presente trabalho se justifica devido à instalação, na região do Porto do Pecém, no Ceará, de uma Usina Termelétrica a Carvão pulverizado. A tecnologia proposta para a redução do teor de enxofre nos gases que serão liberados para a atmosfera (FGD semi-seco) requer a utilização de uma mistura umedecida de alguns tipos de cinzas com leite de cal, gerando um resíduo com teor elevado de enxofre. Mesmo nos países que já utilizam essa tecnologia de dessulfurização, a pesquisa sobre o destino desses resíduos ainda é incipiente. Por esse motivo, é fundamental que se iniciem estudos científicos de caracterização e aproveitamento desse material, que é potencialmente danoso ao meio-ambiente. A questão crucial é transformar os resíduos em subprodutos com aplicação economicamente viável.

Com uma produção estimada em mais de 30t por hora, a partir de julho de 2011, esse material, caso não tenha nenhuma utilidade industrial, irá simplesmente ser acumulado em um aterro ou lago de contenção, o que é indesejável, do ponto de vista ambiental. A pesquisa descrita nesta dissertação é o ponto de partida para se estudar de maneira racional o problema, tentando resolvê-lo antes que ele se torne mais grave.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

### **2.1 Reciclagem**

Considera-se reciclagem o reaproveitamento de materiais beneficiados como matéria-prima para um novo produto. Vários materiais podem ser reutilizados ou reciclados, como o papel, o vidro, o metal e o plástico. Suas maiores vantagens são a minimização da utilização de fontes naturais, muitas vezes não renováveis, além da redução da quantidade de resíduos que necessita de tratamento final, como aterramento, ou incineração (REIJNDERS, 2000).

Menezes, Neves e Ferreira (2002) apontam várias vantagens da reutilização de resíduos (independente do seu tipo) em relação aos recursos m m - prima, diminuição do consumo de energia, menores emissões de poluentes e melhoria na saúde.

Segundo Motta (2008) o acúmulo de resíduo sólido no meio ambiente é uma questão antiga, pois esta questão sempre foi carente de regularização e fiscalização. Esta falta de cuidado com Meio Ambiente, além de comprometer o desenvolvimento econômico, gerou grandes problemas, tais como: degradação da natureza, perda da Biodiversidade.

Contudo, a geração de resíduo sólido no mundo e no Brasil tende a diminuir, pois já existe uma conscientização de empresas de que estes resíduos sólidos estão associados a custo, visto que necessitam de um tratamento adequado. Empresas do setor privado da América do Norte e Europa investem em pesquisas, e avaliam a reciclagem como algo rentável, pois aumentando a qualidade do produto reciclado acarretará em uma maior eficiência do setor produtivo. (FERNANDES, OLIVEIRA E HOTZA, 2003).

No Brasil, apesar de diversos pesquisadores estarem se dedicando ao estudo deste tema, a reciclagem ainda é algo bem distante de empresários e cidadãos, pois ainda não faz parte de sua cultura.

Prevenir a poluição através da reciclagem pode diminuir a extensão dos riscos impostos sobre o meio ambiente e na saúde humana. Além de reduzir as

fontes de resíduos (aterros) podem-se diminuir os custos de tratamento de resíduos; com a reciclagem economizam-se recursos naturais (YANG, 1995).

A reciclagem considerada como estratégia para minimização de resíduos oferece dessa forma vários benefícios, dentre eles: reduz a demanda sobre os novos recursos, diminui o tempo de transporte e custos de produção de energia, além de utilizar os resíduos que de alguma forma seriam perdidos para aterros sanitários (EDWARDS, 1999 apud TAM E TAM, 2006).

Os governos locais precisam entender os benefícios potenciais da reciclagem de resíduos, além de organizar e gerir programas de reciclagem. Deve-se considerar opções apropriadas para programas de reciclagem no que diz respeito a condições financeiro-econômicas, da situação existente, regulação, e institucionais, meio ambiente, sócio-cultural, e questões técnicas. (SUTTIBAK e NITIVATTANANON, 2008).

Além disso, o aumento das taxas de produção de resíduos associado com o esgotamento de aterros sanitários e a dificuldade de encontrar novos locais para o depósito destes materiais, são fatores importantes para que governos invistam em pesquisas na reutilização de resíduos sólidos (NITIVATTANANON e GAUGER, 2004).

Pode-se afirmar, de forma convicta, que a reciclagem de resíduos sólidos é uma forma bastante eficaz de diminuir a poluição e o impacto ambiental ocasionados por estes. Daí, a importância do governo investir em campanhas e principalmente no financiamento de pesquisas que envolvam este problema.

## **2.2. Carvão mineral**

O carvão mineral é um combustível fóssil retirado do solo pelo processo de mineração, e é composto essencialmente de átomos Carbono (pode-se afirmar que quanto maior for o teor de carbono mais puro ele será) e átomos de Magnésio, geralmente é encontrado na forma de *betumes*. (CARVÃO MINERAL, 2010)

A Associação Brasileira do Carvão Mineral (2009) o caracteriza por possuir coloração preta ou marrom e ter aparência lisa, macia e quebradiça. É

encontrado em grandes profundidades ou perto da superfície. É procedente de depósitos de restos de plantas e árvores de uma vegetação pré-histórica que se acumulou há milhões de anos, estes depósitos foram cobertos por argilas e areias, ocorrendo um soterramento gradual, que provocou aumento de temperatura e pressão sobre a matéria orgânica depositada. Isto expulsou o oxigênio e o hidrogênio, concentrando o carbono (processo de carbonificação). Existem quatro estágios na formação do carvão mineral: turfa, linhito, carvão (hulha) e antracito, os quais dependem de fatores como pressão e temperatura para sua formação.

Os estágios do carvão mineral podem ser explicados da seguinte forma:

- **Turfa:** É o primeiro estágio. É onde ocorre a deposição e decomposição de restos de vegetais no solo.
- **Linhito:** É a segunda etapa. Ainda apresenta alto percentual de água e baixo teor de Carbono.
- **Hulha:** É a terceira fase. Possui grande valor econômico, pois fornece mais calor.
- **Antracito:** É a última etapa. Apresenta elevado teor de carbono, aproximadamente 95%, além de ser bastante compacto e possuir elevada dureza.



**Figura 01:** Carvão mineral. (CARVÃO MINERAL, 2009.)

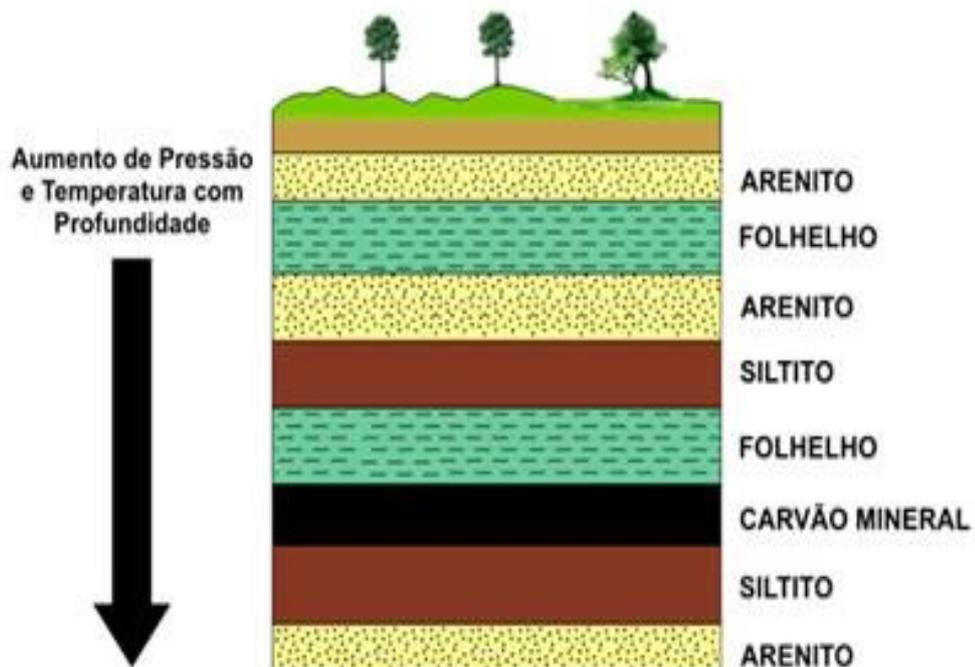
A tabela a seguir apresenta uma distribuição de componentes de cada um dos tipos de carvão:

**Tabela 01-** Componentes dos tipos de carvão mineral (percentual). (SANTOS, 2003).

Componentes	Turfa	Linhito	Hulha	Antracito
Umidade	65 a 90	15 a 45	1 a 3	---
Carbono	55	65 a 75	75 a 90	90 a 96
Oxigênio	33	25	3 a 11	4 a 11
Cinzas	10	9	0,5 a 40	3 a 30

O carvão mineral é uma rocha sedimentar composta por matéria orgânica e inorgânica. No começo o carvão é denominado de turfa, que a partir de alguns processos de carbonificação evolui para o carvão propriamente dito.

Ele é originado de um processo de eliminação de vários elementos da madeira dentre os quais podem ser citados:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , além de ocorrer uma associação com vários minerais inorgânicos, os carbonatos, sulfetos, sílica, e uma quantidade significativa de óxidos como o Óxido de Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e Óxido de Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e ainda elementos denominados elementos traços que são metais pesados, tais como Manganês (Mn), Lítio (Li), Escândio (Sc), Chumbo (Pb) e outra infinidade de elementos (SANTOS, 2003).



**Figura 02:** Formação do carvão mineral. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL, 2009).

A figura 02 mostra que para a formação do carvão são necessárias várias condições favoráveis, necessitando do desenvolvimento de uma vegetação, a qual permite acúmulo de grande quantidade de substância vegetal, condições de proteção contra a decomposição total da matéria orgânica, cobertura imediata pelo corpo de água, e após o acúmulo subaquoso, deve ocorrer o sepultamento contínuo e prolongado por sedimentos, preferencialmente argila e silte, durante um longo tempo (milhões de anos) (GUERRA e GUERRA, 1997).

As plantas morrem e formam massa de matéria vegetal em decomposição. Em um processo de soterramento por várias camadas de sedimentos, essa matéria vegetal é transformada, sob ação de temperatura e pressão em carvão mineral.

De uma maneira superficial o carvão mineral pode ser considerado uma parte celulósica da vegetação que foi transformada pelo tempo e por alguns aspectos físicos (pressão, temperatura) em uma massa de carbono. Falando de maneira específica, os vegetais após caírem das árvores foram soterrados

por sedimentos e no meio de uma grande pressão e temperaturas elevadas foram transformadas em carvão mineral. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL, 2009).

No Brasil, a formação desse combustível se deu há milhões de anos (cerca de 200 milhões) quando o país estava sujeito a terremotos, vulcões e vendavais. Nessa época geológica existiam grandes florestas que favorecidas pelo acúmulo de CO<sub>2</sub>, permitindo a ação da clorofila e o crescimento dos vegetais. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL, 2009).

Na categoria de combustíveis fósseis o carvão é o que possui maior reserva do mundo, sendo seus maiores produtores China e Rússia seguida pelos Estados Unidos. (CARVÃO MINERAL, 2009). No Brasil, as principais reservas se localizam na Região Sul do país.

A distribuição das reservas do carvão mineral é muito irregular, sendo predominante no hemisfério norte (aproximadamente 97%), e os produtores segundo Santos (2003) também se localizam no hemisfério norte.

**Tabela 02-** Maiores produtores mundiais de carvão mineral. (SANTOS, 2003)

País	Produção (milhões de ton)	Percentual
China	885,0	27,3
Rússia	610,0	18,8
EUA	606,5	18,7
Polônia	291,5	9,0
Índia	179,8	5,5

Do carvão *in natura* é possível extrair grandes números de subprodutos, como alcatrão, do qual se destilam o benzol ou o benzeno, xilol, toluol, e outros compostos orgânicos, além desses, obtêm-se, secundariamente, o ácido fênico ou fenol, a naftalina, dentre outros (GUERRA e GUERRA, 1997).

A principal aplicação do carvão mineral é de ser combustível, principalmente para atividades metalúrgicas e de geração de energia. O carvão mineral pode ser aplicado para diversos fins, dentre eles podemos citar: geração de energia, e além de também ser utilizado nas indústrias petroquímica, farmacêutica e carboquímica, de cimento, dentre outras (MARTINS, 2001).

Muitos estudos descrevem a adição de rejeitos industriais, tais como: borra de petróleo, cinzas de carvão, resíduos urbanos, granito, lodo da indústria têxtil e massas argilosas (SILVA *et al*, 2005).

A dificuldade da utilização do carvão mineral tem sido cada vez maior. Isso pode ser explicado devido ao fato de que os depósitos carboníferos nem sempre tem boa qualidade, e também, pela profundidade que se encontram as jazidas (SANTOS, 2003).

### **2.3. Cinzas do carvão mineral.**

Pode-se dizer que as cinzas são um subproduto da queima do carvão mineral nas Usinas Termelétricas entre as temperaturas de 900 e 1600 °C.

Um processo importante para a queima do carvão mineral é a geração das cinzas, que podem ser classificadas em: escórias, de fundo (bottom ash) e volantes (fly ash).

Segundo Martins (2001), as cinzas geradas durante o processo de queima do carvão podem ser divididas em três tipos:

*“ são originadas durante a combustão de carvão granulado em grelhas móveis. São geralmente retiradas pelo fundo da fornalha, após serem apagadas em água. Apresentam granulometria grosseira e blocos*

*sinterizados, contendo teores significativos (5 a 20%) de carbono e material orgânico incombusto.*

*Cinzas de Fundo (bottom ash) São cinzas mais pesadas e de granulometria média, que caem para o fundo das fornalhas de queima de carvão pulverizados ou de leito fluidizado, podendo ser retirada secas ou através de um fluxo de água. Geralmente, contem teores de carbonos e material orgânico não queimado de 1-5%.*

*Cinzas Volantes (fly ash) São cinzas leves constituídas de partículas muito finas, todas abaixo de 0.15mm e com alto teores de frações menores que 0.05mm. Este é o resíduo da combustão do carvão que entra no fluxo de gás da chaminé, podendo ser coletado nos precipitadores eletrostáticos ou em filtros mecânicos, ou ainda, serem*

”

A composição das cinzas está associada ao carvão de origem e às condições de queima deste, podendo apresentar novas substâncias por meio de combinações dos elementos de origem, mantendo os mesmos compostos (Elementos com alto ponto de fusão) ou ainda alterar as fases (SANTOS, 2003).

Existem várias pesquisas que analisam a composição química das cinzas volantes de diversas termoelétricas mundiais. Apesar de estas cinzas serem de diferentes localidades existe uma coerência em relação a sua composição química.

Santos (2003) afirma que apesar de composição das cinzas fly ash (cinzas volantes) variarem de acordo com a origem do carvão, tipicamente as cinzas são compostas por silício, cálcio, alumínio, ferro, magnésio e óxido de enxofre e vários elementos traços também chamados de metais pesados. Abaixo segue uma análise química de uma importante Termoelétrica brasileira, situada na região sul do país.

**Tabela 03-** Análise química média das cinzas volantes de uma termoelétrica do Rio Grande do Sul- Rs. (SILVA, 1999)

Composição	(%)
SiO <sub>2</sub>	67 - 71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19 - 24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 - 8
CaO	0.20 - 1.10
MgO	0.20 – 1.80
Na <sub>2</sub> O	0.10 – 0.70
K <sub>2</sub> O	0.40 - 1.50
Outros	0.10 - 0.70

Do mesmo modo, as cinzas pesadas (bottom ash) são compostas exclusivamente por Sílica, alumina e óxido de ferro. Além de óxidos (cálcio e magnésio) em menor quantidade (LEANDRO,2005).

PAPROCKI et al (2008) afirmam que as cinzas do carvão mineral são constituídas em sua maior parte por óxidos de silício e alumínio, além de metais alcalinos e alcalino-terrosos em pequena quantidade.

Estudos afirmam que a concentração de metais pesados nas cinzas em relação ao carvão origem é maior, devido à volatilização e condensação de alguns elementos sobre a superfície das cinzas. (ANZZOLINI,2008)

O pH das cinzas irá variar de acordo com a concentração de enxofre presente nas mesmas: Assim, carvão com uma alta concentração de enxofre irá produzir cinzas ácidas, enquanto com baixa concentração, cinzas alcalinas. Diz ainda que as cinzas são intemperizadas, ou seja, sofrem alterações físico-químicas com o tempo (MARTINS, 2001).

As cinzas volantes (*fly ash*) são arrastadas pelos gases de combustão das caldeiras e depois captadas pelos precipitadores eletrostáticos. Tanto as características tecnológicas quanto as estruturais estarão relacionadas com as características do carvão e as condições de queima (SILVA *et al*,1999). As propriedades destas cinzas dependem de vários fatores, tais como: a composição do carvão origem, a condição de combustão, o tipo e a eficiência do controle de emissões.

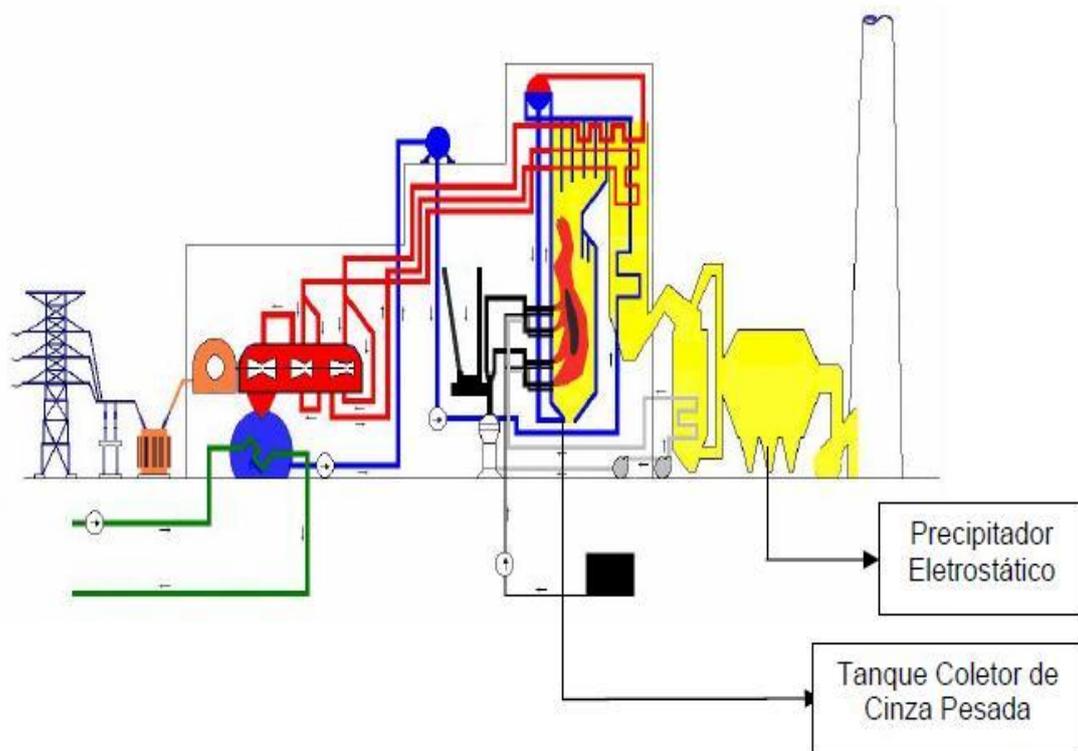
#### **2.4 Processos de obtenção das cinzas leves e pesadas**

As cinzas provenientes das usinas termoelétricas, que utilizam o carvão mineral como combustível, é resultado da combustão do carvão pulverizado a altas temperaturas no interior das caldeiras (LEANDRO, 2005).

Devido à existência de diferentes zonas de temperaturas no interior das caldeiras, as partículas do carvão pulverizado irão apresentar, após a queima, características químicas, físicas e microestruturais, sendo possível classificá-las em cinzas leves (secas) e pesadas (úmidas). As temperaturas altas provocam nas partículas uma forma arredondada, por outro lado, as que foram submetidas a baixas temperaturas provocam um menor grau de arredondamento.

O processo mais simples da queima do carvão mineral é o seco. Neste processo o carvão pulverizado é queimado, e cerca de 80 % do material não queimado (cinzas leves) são conduzidos pelos gases de combustão através de dutos até os precipitadores eletrostáticos. Em seguida, as cinzas coletadas são armazenadas em silos concretos (LEANDRO, 2005).

Os 20% restantes do material não queimado é a cinza pesada, este material cai por gravidade, através da caldeira em um tanque.



**Figura 03-** Esquema de produção de energia e geração de cinzas. (LEANDRO, 2005).

Nos Estados Unidos, é produzido outro tipo de cinza, que é derivada de uma tecnologia que permite controlar a emissão de dióxido de enxofre na atmosfera. Isto é devido ao carvão ser queimado em uma caldeira denominada AFBC (*Atmospheric Fluidized Bed Combustion*). Uma grande desvantagem desse tipo de caldeira é que são produzidas grandes quantidades de resíduos sólidos. Para um melhor exemplo, nesse tipo de caldeira (AFBC) para cada tonelada de carvão queimado é adicionado cerca de meia tonelada de pedra calcária, aumentando assim, cerca de 4 vezes a geração de resíduos sólidos se comparado a outro tipo de caldeira (DESCHAMPS, 1997).

Todo carvão mineral combustível tem, em sua composição, cinzas e enxofre além de outros componentes (umidade, hidrogênio, Nitrogênio, etc). Durante o processo de queima, na fornalha da Caldeira, o enxofre se transforma em  $SO_2$  e  $SO_3$  e as cinzas, em cinzas volantes (fly ash). O  $SO_2/SO_3$  são gases na temperatura da caldeira e as cinzas são materiais sólidos

contidos no fluxo gasoso (Os gases  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  causam a chamada chuva ácida, provocando corrosão de materiais, impacto ambiental para seres vivos em geral, contaminação do ar, dos solos e de águas; Já as cinzas volantes causam problemas respiratórios aos seres vivos, contaminação de água, solos, etc).

Os gases contaminados por  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$  e material particulado podem ter suas quantidades reduzidas de várias maneiras. No caso do material estudado neste trabalho, o sistema empregado foi o chamado FGD – Flue Gas Desulfurization – Sistema de Dessulfurização de Gases.

O objetivo do sistema de Dessulfurização de Gases é a redução dos poluentes contidos nos gases de combustão provenientes da caldeira. Ao final do FGD, os resíduos do processo (os gases, sais e material particulado ou pó) são forçados a passar por um filtro de mangas, que é um equipamento puramente mecânico. Grande parte do material sólido é retido no tecido filtrante das mangas, e uma pequena parcela consegue passar pelo tecido e sai com os gases. O pó retido no filtro de mangas cai por gravidade em uma tremonha de coleta. Das tremonhas, o pó é transportado para os silos de armazenagem.

## **2.5. Granito**

As rochas podem ser divididas em dois grupos: as carbonáticas (mármore, dolomitos, etc) e as silicáticas (granitos, arenitos, etc). O granito é uma rocha ígnea e metamórfica.

Segundo Mello (2006), o granito é uma rocha silicática composta em grande parte por feldspato, quartzo. O granito é constituído por cristais de feldspato, quartzo e mica e que as variações dos constituintes mineralógicos conferem as texturas das rochas.

O silício é um dos elementos mais abundante da crosta terrestre, principalmente com a sílica (Combinado com Oxigênio), além disso, a sílica pode existir em diversas formas (Polimorfismo) apresentando, assim, a mesma forma empírica diferindo no arranjo das unidades estruturais, tendo como estrutura básica  $\text{SiO}_4$  (FÉLIX, 2001).

O Brasil possui grandes reservas de pedras ornamentais que são utilizadas como pisos e revestimentos. Estas pedras além da beleza trazem

algumas características físico-químicas importantes (MOREIRA, FREIRE e HOLANDA, 2003).

O Ceará possui grandes reservas de granito, que são comercialmente exploradas para a fabricação de pisos e revestimentos, e só no ano de 1999 produziu cerca de 124.800 toneladas de blocos de mármore e granito. Em 2001, o estado do Ceará ocupava a sexta colocação entre os estados produtores de granito do Brasil (FÉLIX, 2001).

De acordo com Vidal (1999), existem várias rochas silicáticas do Estado do Ceará, catalogadas na literatura, com informações importantes como: nome comercial, nome petrográfico, massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ), porosidade (%), absorção (%), resistência a compressão (MPa), resistência a flexão (Mpa), Impacto (cm) e desgaste amsler (mm).

O granito Asa Branca é um tipo de granito catalogado, que possui jazida no município de Santa Quitéria, e vem sendo estudado por alguns pesquisadores do Ceará. A tabela 04 a seguir fornece algumas informações sobre este material.

**Tabela 04-** Propriedades do granito Asa Branca. (VIDAL, 1999).

Nome comercial	Nome Petrográfico	Massa Específica ( $\text{g/cm}^3$ )	Porosidade (%)	Absorção de água(%)	Resistência à Compressão (Mpa)	Resistência à Flexão (Mpa)
Granito Asa Branca	Albita Granito	2,560	2,92	1,140	66,60	11,90

Félix (2001) realizou uma análise de difração de Raios-X e conclui que os componentes do granito Asa Branca são: Quartzo, Albita e Microclina, conforme a tabela 05 a seguir;

**Tabela 05-** Análise quantitativa do Granito por difratometria de pó (FÉLIX, 2001).

Composição Método	Albita	Quartzo	Microclina
Raio-x	31%	58%	11%

## 2.6 Produtos sólidos gerados pela combustão do carvão mineral

Os produtos sólidos originados da combustão do carvão mineral são considerados, geralmente, como um rejeito inútil e apresentam um teor médio de cinzas muito elevado 51,1% (dados EDP). Independente dos vários usos que podem ser dados para as cinzas, seja na produção de cimento pozolânico, agregados leves para concretos ou produção de materiais construtivos, os constituintes não voláteis presentes nas cinzas sempre estarão presentes nestes materiais independentes de suas concentrações.

A composição da cinza depende do tipo de carvão e do processo de combustão. Existem trabalhos que avaliam o aproveitamento da cinza de carvão mineral na agricultura, com base na sua caracterização, constatando seus principais elementos químicos (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Al, Si, Ti, B, Cu, Zn, Mn, Mo, Pb, Ni, Cd, Cr, C e S). Quanto a disposição da maioria destes elementos químicos ao meio ambiente, deve ser obedecida a norma brasileira NBR 10004, que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública.

## 2.7. Aplicações das cinzas do carvão mineral.

Em 2004, a produção de carvão no Brasil para a geração de energia era aproximadamente 3,5 milhões de toneladas, o que gerava cerca de 1,7 milhões toneladas de cinzas por ano. Deste total, apenas 0,5 milhões de toneladas das cinzas eram utilizadas no setor de construção civil. Como é previsto no Brasil até 2010 um aumento de 100 % no consumo de carvão nas termoeletricas, a

produção de cinzas poderá chegar a 4,0 milhões por ano, enquanto que a utilização desta não seguirá a mesma proporção (FERRET, 2004).

Desta produção anual de cinzas 90% é gerado por Usinas Termoelétricas, o restante por empresas de pequeno porte (Indústria de celulose) e de grande porte (Petroquímica). Além disso, do total de produção de cinzas, 80% são cinzas leves e 20% cinzas pesadas (PAPROCKI *et al*, 2008).

Logo, o grande problema é o aproveitamento destas cinzas em algum ramo tecnológico, evitando assim, o depósito em aterros. O uso das cinzas do carvão para a fabricação de materiais cerâmicos tem sido relatado por vários autores. Entretanto, questionou-se o uso das cinzas do carvão mineral em materiais cerâmicos por conter elementos traços e conseqüentemente uma radioatividade natural (SANTOS, 2003).

Porém, em um estudo feito por Wyszomirski e Brylska (1996) comprovou-se que os níveis de radiatividade produzidos pelas cinzas estão em níveis bastante toleráveis, além de produzirem efeitos benéficos ao ambiente.

Há uma série de possibilidades para a utilização de cinzas provenientes da queima do carvão. Elas podem ser usadas para a produção de cerâmica, materiais de construção (tijolos), ligantes (cimento e concreto), dentre outras aplicações (MARTINS, 2001).

Quando aplicadas ao cimento a concentração dessas cinzas varia entre 15 a 40 %, diminuindo o custo, já que as cinzas são mais baratas do que o cimento que substituem.

Em 1977, a Companhia Riograndense de Mineração fabricou e caracterizou peças de cerâmicas (argila+ carvão mineral) e concluiu-se que quando misturadas e submetidas a processos de moldagem, secagem e queima, resultam em cerâmicas de altíssima qualidade comparadas às cerâmicas mais vendidas na época (SANTOS, 2003).

As cinzas volantes possuem características pozolânicas, com isso é aplicadas a indústria de cimento (VARGAS *et al*, 2007). Por conter óxidos alcalinos, as cinzas do carvão são utilizadas para diversos fins, entre elas o uso na agricultura (QUERALT *et al*, 1997).

*Os resultados mostram que a heterogeneidade dos produtos cerâmicos tradicionais permite a incorporação de uma quantidade razoável desses rejeitos sem prejuízo das propriedades dos produtos finais e com o alívio muito bem-vindo das preocupações com o descarte dos*

”

## **2.8. Cerâmica:**

A origem da palavra cerâmica vem do grego “*κέραμος*” que tem como significado *terra cozida*. Este material tem a necessidade de algum tratamento térmico para obter suas propriedades desejáveis (SANTOS, 2003).

A maioria das cerâmicas consiste em composto formado por elementos metálicos e elementos não-metálicos, e freqüentemente composto por mais de dois elementos. A ligação atômica desses materiais varia desde puramente iônica até totalmente covalente. Existem cerâmicas que exibem uma combinação destes dois tipos de ligação, sendo que o caráter iônico das ligações interatômicas irá depender da eletronegatividade dos átomos (REED, 1988).

Por exemplo, para os materiais grosseiramente conhecidos como cerâmicas tradicionais (tijolos, sanitários, dentre outros) o tipo de ligação predominante é a iônica. Já para os materiais denominados de cerâmicas de alta tecnologia a ligação predominante é a covalente.

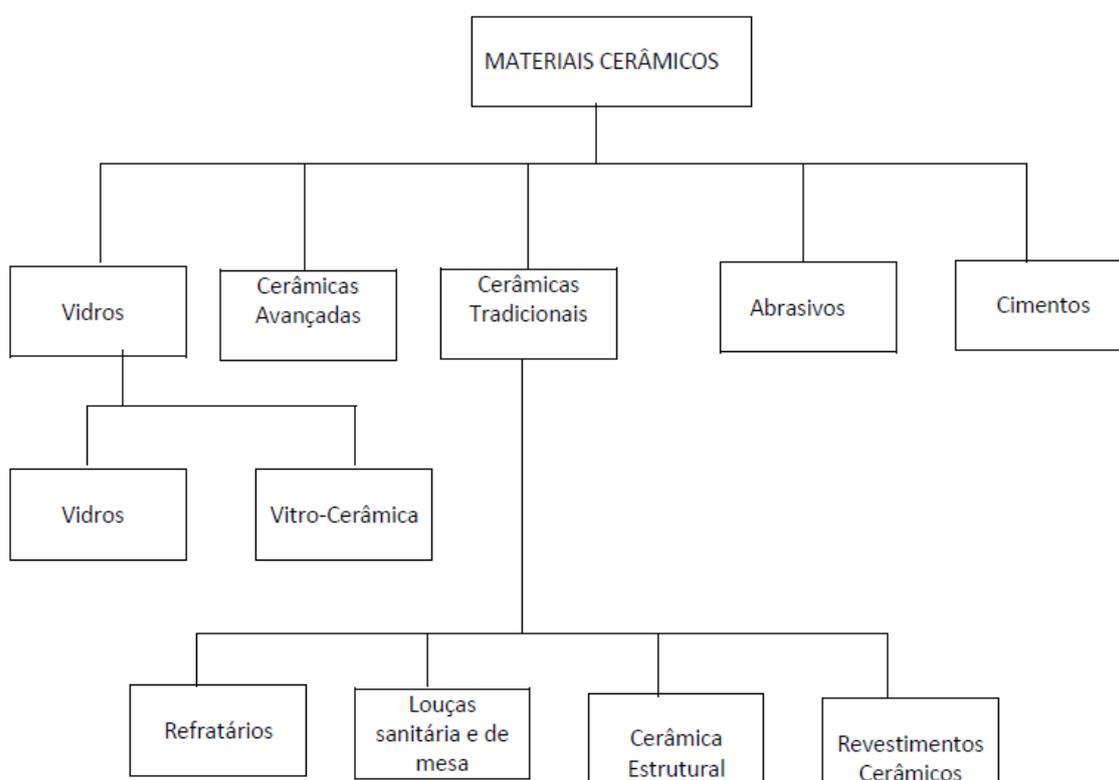
Podemos ainda, resumir algumas propriedades das cerâmicas, tais como:

- São geralmente isolantes de calor e eletricidade.
- Possuem baixa densidade.
- Em relação às propriedades mecânicas as cerâmicas são duras, porém frágeis.
- Geralmente são óxidos, nitretos e carbetos.

- São materiais inorgânicos e geralmente formados por um metal e um não-metal.
- São mais resistentes á altas temperaturas que metais e polímeros.
- Possui maior rigidez, porém menor plasticidade em relação aos orgânicos.

### 2.8.1. Aplicações das cerâmicas:

A variedade de composições dos materiais cerâmicos, assim como sua estrutura, bem como seus tipos de ligações, faz com que estes materiais possuam uma vasta aplicabilidade. De acordo com suas aplicações pode-se classificar os materiais cerâmicos conforme o esquema apresentado na figura 04, abaixo:



**Figura 04** – Classificação dos Materiais Cerâmicos. (MATERIAIS CERÂMICOS, 2005)

De uma maneira sucinta pode-se dizer sobre os materiais cerâmicos:

- Vidros: Possui uma relativa facilidade de fabricação. São resistentes a choques térmicos e químicos. Além de possuir transparência ótica.
- Vitro - Cerâmica: Possuem uma alta condutividade térmica, logo podem ser aplicadas em louças para irem à mesa. Possui também elevada resistência mecânica.
- Cerâmicas avançadas: São bastante usadas em motores a combustão interna, chapas de blindagem e componentes eletrônicos.
- Refratários: Basicamente, são materiais que suportam alta temperatura, sem perder suas propriedades físico-químicas. Alguns autores dividem os refratários em quatro grupos: argila refratária, refratário de sílica, refratário básico e refratário especiais.
- Revestimento cerâmico: Existe uma vasta diversificação de produtos, que não diferem apenas na cor e no formato, mas também, nas propriedades mecânicas.
- Abrasivos: As cerâmicas abrasivas são usadas para cortar ou esmerilhar materiais mais moles. O material cerâmico abrasivo mais comum é o carbeto de Silício.
- Cimento: A principal característica desses materiais é que quando misturados com água formam uma pasta, que pega e endurece.

## **2.8.2 Processamento das cerâmicas**

### **2.8.2.1 Moagem**

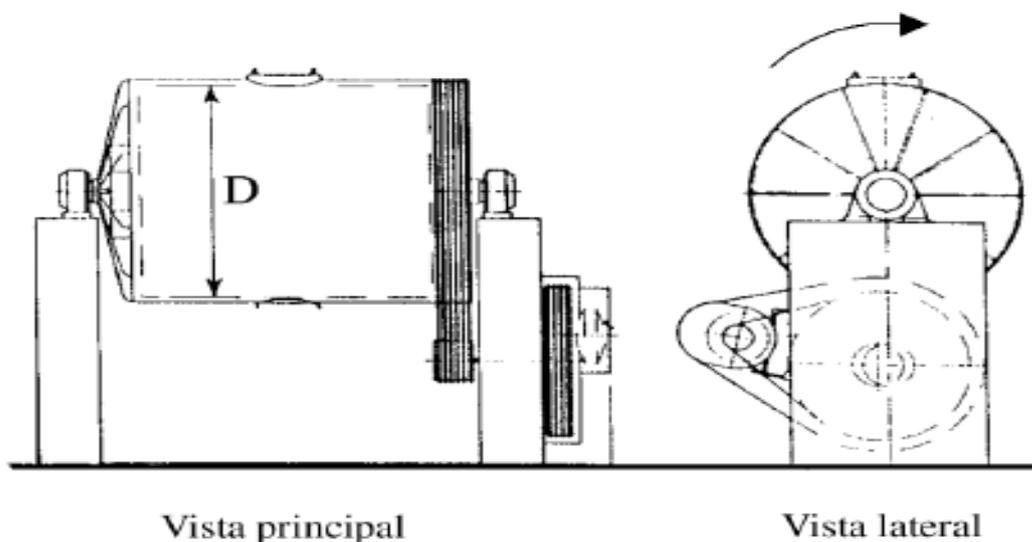
A moagem é um processo que utiliza forças mecânicas para diminuir o tamanho de partículas que constituem o pó cerâmico (MORAES, 2004).

É uma etapa crítica, onde o controle da granulometria deve ser mantido para que não ocorram interferências na compactação e sinterização do pó (MORAES, 2007).

Este processo reduz o tamanho da partícula do material por intermédio de trituração e fratura. Os equipamentos responsáveis por este processo são denominados de moinhos.

Um equipamento bastante utilizado é o moinho de bolas, que consiste em um cilindro de rotação, cujo interior são colocados esferas de zircônia ou outro material de elevada dureza. Estas se chocam com o material a ser triturado, diminuindo assim o tamanho médio das dimensões das partículas.

De um ponto de vista mais detalhado, a trituração do material se dá pelo choque das bolas (corpo moedor) com o material sob moagem ou pelo atrito das paredes com as partículas.



**Figura 05-** Vista principal e lateral do moinho de bolas. (RIBEIRO E ABRANTES, 2001).

Estes moinhos são constituídos por um cilindro oco, com um eixo na posição horizontal sobre o qual é imprimido o movimento de rotação. Ribeiro e Abrantes (2001) apontam alguns fatores que podem influenciar no rendimento da moagem, afetados pelas características da matéria – prima, os quais podemos citar:

- Dimensão e forma inicial das partículas;
- Dureza do material,

- Estrutura homogênea ou heterogênea,
- Umidade ou higroscopicidade,
- Sensibilidade à variação de temperatura,
- Tendência à aglomeração,

### **2.8.2.2 Peneiramento**

De acordo com a granulometria escolhida, as peneiras deverão estar dispostas com uma abertura decrescente (de cima para baixo), desta forma a última peneira (a de baixo) será de abertura igual a do tamanho da partícula selecionada.

Neste processo ocorre à seleção do tamanho da partícula para a fabricação do material, e seu arranjo consiste em um jogo de peneiras e um agitador (CABRAL, 2009).

### **2.8.2.3 Conformação**

Nesta etapa é confeccionado o *corpo a verde* (como é chamada a peça cerâmica antes da sinterização). É onde ocorre, simultaneamente, a densificação e conformação do pó cerâmico.

De acordo com Reed (1988) existem três procedimentos básicos de prensagem de pós: uniaxial, isostático (ou hidrostático) e prensagem a quente.

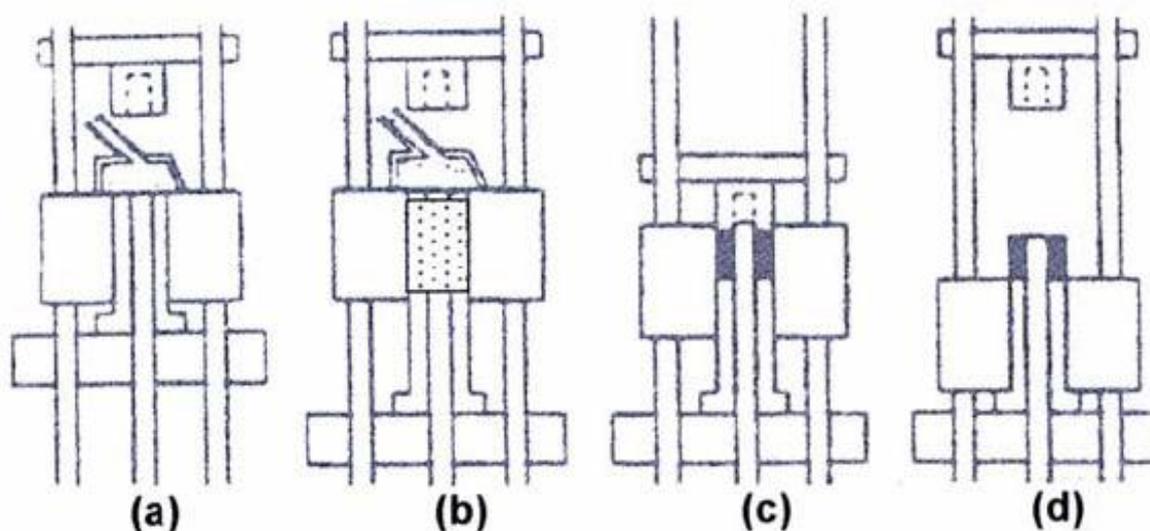
O processo de compactação de materiais cerâmicos por prensagem uniaxial a seco é bastante simples e muito utilizado, o pó é compactado em um molde metálico através de uma pressão que é aplicada ao longo de uma única direção, assim a peça compactada assume a configuração do molde. Esse método possui altas taxas de produção e baixo custo, além disso as formas das cerâmicas são relativamente simples (REED, 1988).

Na prensagem isostática, o material na forma de pó está contido em um molde de borracha, e a pressão é aplicada isostaticamente (possui a mesma magnitude em todas as direções) por um fluido. Esta técnica é mais cara que a anterior, porém são possíveis formas mais complexas.

Na prensagem a quente, ocorre a compactação e o tratamento térmico, simultaneamente, o agregado pulverizado é compactado a uma temperatura

elevada, esta técnica é onerosa em termos de tempo, devido ao aquecimento e resfriamento do molde e da matriz.

A figura 06 apresenta de forma esquemática o processo de compactação (conformação).



**Figura 06** - Estágios da compactação: (a) Enchimento; (b) Fechamento; (c) Prensagem; (d) Ejeção (CABRAL, 2009).

Segundo Leite (2005) os pós cerâmicos são transformados em corpos de formato e densidade desejada, mas, sem ainda possuir as propriedades mecânicas desejáveis.

#### **2.8.2.4 Sinterização (queima)**

O processo de sinterização é uma técnica conhecida no mundo inteiro na produção de materiais cerâmicos convencionais (EROL, KUÇUKBAYRAK e MERIÇBOYU, 2008). Quase sempre é a última etapa no processamento cerâmico, e é uma das mais importantes.

Segundo Moraes (2004) a sinterização é um processo no qual pequenas partículas são ligadas por difusão no estado sólido.

A sinterização é um processo termodinâmico de não-equilíbrio. O agregado de pó ou compactado adquire uma estrutura sólida coerente, por meio da redução da área superficial específica, resultando na formação de

contornos de grãos e crescimento de pescoços de união interpartículas, levando normalmente o sistema à densificação e contração volumétrica (ALBUQUERQUE, 2004).

A sinterização é conjunto de transformações sofridas por um material durante um tratamento térmico de alta temperatura. Nesta etapa, as partículas da matéria-prima que antes possuía ligações fracas, agora se encontram fortemente ligadas entre si. Neste processo também ocorre uma redução nas dimensões da peça, além de ser responsável pelas características mecânicas peculiares das cerâmicas. Geralmente, durante a sinterização os movimentos atômicos são estimulados por altas temperaturas e os processos difusivos são dominantes (SANTOS, 2003).

Para Salles (2008) sinterizar significa ligar as partículas gerando uma força atrativa necessária para aglomerar um pó.

Durante a queima, a peça conformada (compactada) apresenta uma contração em volume e experimenta uma redução em sua porosidade, juntamente com a melhoria de sua integridade mecânica. Além, formarem uma massa mais densa, através da união das partículas do pó. As reações de sinterização ocorrem quando a temperatura de queima aplicada ao sistema alcança uma faixa entre um meio e dois terços da temperatura de fusão do material (ALBUQUERQUE, 2004).

Antes do início do processo de queima do *corpo a verde*, muitas das partículas do pó apenas tocam umas nas outras. Durante o processo inicial da sinterização, ocorre a formação de empescoçamentos ao longo das regiões de contato entre as partículas adjacentes. O crescimento do gargalo através do transporte de massa para essa região é bastante desejável, pois haverá uma redução da energia superficial devido ao decréscimo da área superficial total.

Ao continuar a sinterização, um contorno de grão se forma dentro de cada pescoço, e cada interstício entre as partículas formará um poro. Na última parte da sinterização, ocorrerá o crescimento do grão, no qual os poros formam uma forma esférica e isolada. O estágio final da queima ocorre quando os

poros esféricos se contraem de forma lenta pela difusão de vacâncias para os contornos de grãos.

Segundo Moraes (2004): 80

“

*um processo de remoção de poros localizados entre partículas agrupadas e acompanhada por contração*

“ ”

*crescimento e formação de ligações fortes entre partículas*

”

A difusão é termicamente ativada de tal maneira que há um mínimo de energia necessário para movimento atômico e deve também haver locais disponíveis. Para ocorrer essa difusão os átomos ou os íons têm que obter energia necessária para pular de seu local para outros locais vagos.

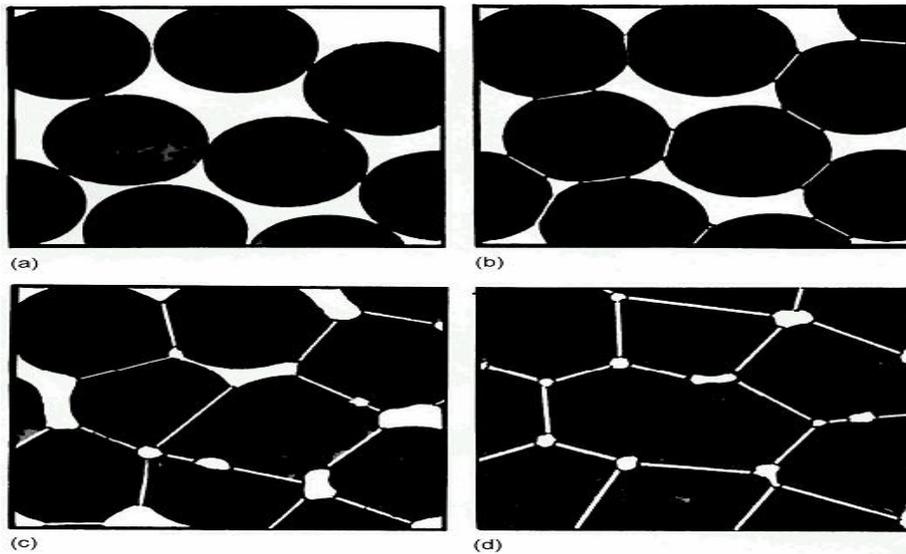
A população de locais disponíveis e o número de átomos com energia suficiente para saltar para locais vagos seguem a Equação de Arrhenius.

$$\frac{N}{N_0} = e^{\frac{-E}{K \cdot T}} \quad (1)$$

Sendo:

- $N/N_0$  = Razão do número de átomos ativados em relação ao número de átomos total;
- E = Energia de ativação;
- K = Constante de Boltzmann;
- T = Temperatura.

A figura 07, ilustrada abaixo, mostra as etapas do processo de sinterização:



**Figura 07-** Etapas do processo de sinterização: a) Partículas de pó; b) Estágio inicial; c) Estágio intermediário; d) Estágio final (FÉLIX, 2001).

#### 2.8.2.4.1 Sinterização por fase líquida

Neste caso, a formação de uma fase líquida capaz de dissolver um percentual de partículas origina um caminho de difusão, o qual é geometricamente análogo ao do contorno de grão na sinterização sólida, provocando uma rápida densificação inicial e o processo subsequente de densificação ocorre por solução de partículas sólidas no líquido e precipitação na região do pescoço (ALBUQUERQUE,2004).

Sinterização com fase líquida é uma forma importante de se manufacturar componentes cerâmicos densos de pós compactos. Vários componentes cerâmicos tecnicamente significantes são fabricados através de sinterização com fase líquida, incluindo substratos de alumina, selos mecânicos, peças de nitreto de silício estrutural, varistores de óxido de zinco, capacitores de BaTiO<sub>3</sub>, componentes piezoelétrico (PLZT).

Há três requerimentos para a Sinterização por fase líquida:

- m
- m
- m m m

ângulo de contato).

ido no líquido.

As duas maiores vantagens da sinterização com fase líquida são: aumento na cinética de sinterização e propriedades mais maleáveis, dentre as desvantagens da sinterização com fase líquida são: as cerâmicas densificadas por este processo tem uma maior susceptibilidade à distorção do formato e o controle dos parâmetros de sinterização pode se tornar complicado devido à presença da fase líquida (FÉLIX, 2001).

## 2.9 Caracterização das cerâmicas

### 2.9.1 Difração de Raio-x

A identificação de estruturas cristalográficas é freqüentemente feita por difração de raio-X- DRX (em inglês –X-ray diffraction, como é mais conhecida). Uma grande vantagem nesta caracterização é a sua rapidez e seu caráter não-destrutivo. Por outro lado, uma grande desvantagem é que esta técnica não pode ser aplicada para materiais amorfos. A difração de raios X ocorre quando um feixe incidente, com comprimento de onda do tamanho dos espaços interatômicos, incide sobre um material, sendo assim espalhadas em todas as direções. Em parte, radiações espalhadas por certos átomos são anuladas por radiações espalhadas por outros átomos (SANTOS, 2003).

No entanto, quando as radiações atingem alguns planos específicos do cristal em certos ângulos, sendo  $\sin\theta = \frac{2d}{m\lambda}$   $\theta$  feixe  $d$  é a distancia entre os planos, em vez de serem anuladas elas interferem construtivamente, esse fenômeno é denominado difração (REED, 1988).

### 2.9.2 Fluorescência de Raios-x

Apesar de não permitir uma avaliação completa das composições físico-química, a fluorescência de raios-X nos fornece informações bastante importantes que servirão de auxílio em futuras caracterizações, além de nos fornecer dados de grande interesse industrial (CABRAL, 2009).

### **2.9.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Esta técnica, também conhecida como SEM (do inglês, Scanning Electron Microscopy), utiliza um equipamento que permite fazer uma visualização da superfície de um material através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Com o MEV é possível ver o material com até um aumento de 200.000 vezes (SANTOS, 2003).

### **2.9.4 Análise Termogravimétrica (ATG)**

A análise termogravimétrica – ATG (em inglês, Thermogravimetric Analysis – TGA) é uma técnica que permite acompanhar a variação de massa de uma amostra quando submetida a um aumento de temperatura constante.

A termoanálise consiste em um conjunto de métodos onde se medem algumas propriedades do sistema em função da temperatura. É usada para determinar mudanças da massa da amostra, resultado de transformações químicas e físicas, como uma função da temperatura ou do tempo (CABRAL, 2009).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

---

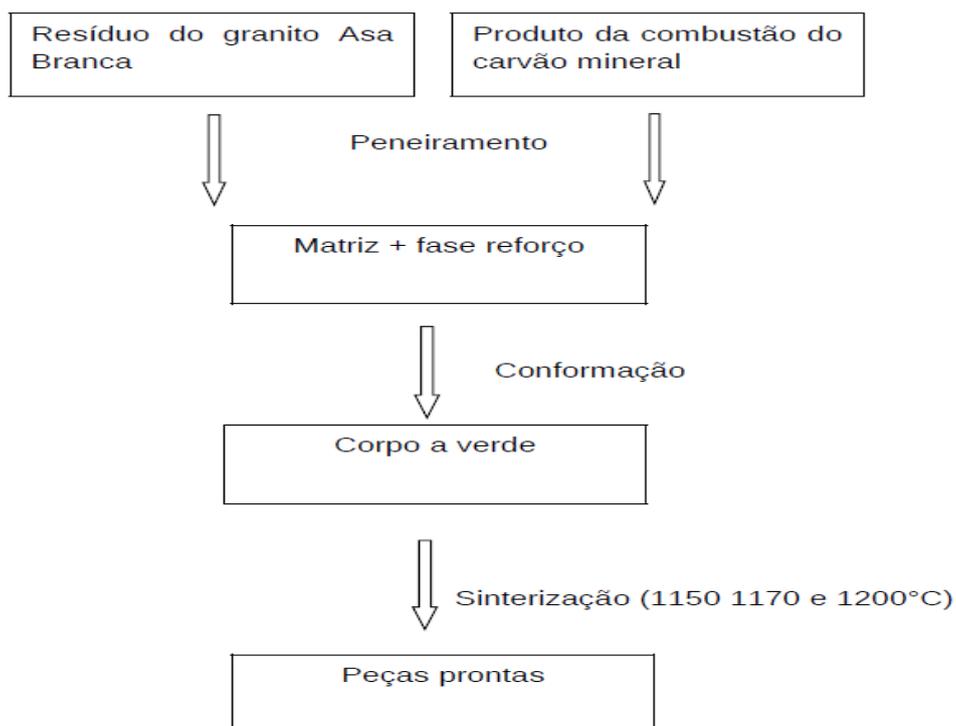
#### 3.1. MATERIAL

- **Matriz-Cerâmica:** O resíduo do granito Asa Branca que foi utilizado como matriz cerâmica é fornecida pela empresa IMARF, Brasil.
- **Fase-Reforço:** Produtos da combustão do carvão mineral que foi utilizado como a fase-reforço é fornecida pela empresa Energia de Portugal - EDP, EUA.

#### 3.2. MÉTODOS

Neste item são apresentados todos os passos e procedimentos da execução deste trabalho. Será explicado de maneira sucinta desde a seleção do material até as caracterizações realizadas.

De uma maneira geral o processo de fabricação dos corpos de provas deste trabalho (resíduo do Granito Asa Branca + produtos da combustão carvão mineral) seguiu o roteiro no fluxograma apresentado a seguir:



**Figura 08** - Processo de fabricação dos corpos de provas.

### **3.2.1. Seleção do material**

Por possuírem semelhanças em suas composições químicas, além de recentes pesquisas que apontaram o êxito na fabricação de cerâmicas com adição das cinzas do carvão mineral, foram selecionados dois materiais: granito Asa Branca e o resíduo da combustão do carvão mineral.

O granito Asa Branca, também conhecido como Branco Cotton, cujo nome petrográfico é Albita Granito, foi utilizado como Matriz-Cerâmica e foi cedido gentilmente pela empresa IMARF, Brasil.

Utilizou-se, como Fase-Reforço, o produto da combustão do carvão mineral, fornecido pela empresa EDP, EUA.

### **3.2.2. Moagem**

O pó do resíduo do granito Asa Branca foi submetido a moagem em moinho de bolas, pertencente a Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará - NUTEC, por um período de 24 horas, com intervalos de três dias por 8 horas cada, para a diminuição da granulometria das partículas seguido de peneiramento em uma peneira com abertura de 200 mesh. Não foi necessário moer o resíduo da combustão do carvão mineral, por se tratar de um pó já bastante fino. Foi utilizada a porção do resíduo que passou pela peneira com abertura de 200 mesh.

### **3.2.3. Mistura**

Para este trabalho, foram confeccionados corpos-de-prova de pó de granito Asa Branca com adições de 0%p, 10%p, 20%p e 30%p (em massa) de resíduo da combustão do carvão mineral.

Os materiais foram pesados em uma balança analítica digital TECNAL do Laboratório de Biomateriais do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, seguindo as devidas proporções. A água destilada foi o material ligante desta mistura: para cada 100g de mistura foram utilizados 5ml de água.

Para uma concentração de 0% utilizou-se 100g do resíduo do granito Asa Branca com adição de 5 ml de água. Para uma concentração de 10% em massa de resíduo da combustão do carvão mineral, foram misturados 90g de

granito Asa Branca+ 10g de produtos da combustão do carvão mineral adicionados de 5ml de água destilada, e assim sucessivamente até uma concentração de 30% em massa de produtos da combustão do carvão mineral.

#### **3.2.4. Compactação (conformação)**

Após a realização das misturas os corpos de provas foram conformados, por compactação uniaxial, numa prensa manual 15 toneladas, utilizando uma carga de 2 (duas) toneladas durante 15s.

Foram confeccionados corpos de prova de formato circular (discos) com o diâmetro de  $d= 18.90\text{mm}$  com uma carga de 2(duas) toneladas . A Figura 09 exhibe o molde utilizado para a confecção das peças.



**Figura 09** – Molde para a produção da Cerâmica.

#### **3.2.5. Sinterização**

A partir do processo de sinterização os corpos-de-prova passaram a ser denominados de GAB 0 (corpos – de – prova do resíduo do granito Asa Branca puro, ou seja, sem adição de produtos da combustão do carvão), GAB 10, GAB

20 e GAB 30 ( de acordo com as quantidades de produtos da combustão do carvão adicionadas).

Os corpos-de-prova de GAB 0, GAB 10, GAB 20 e GAB 30 foram sinterizados às temperaturas 1150, 1170 e 1200 °C durante 60 minutos com uma taxa de aquecimento de 5°C/min no forno Jung LF2312 pertencente ao departamento de Física da UFC. Os discos de GAB 30 foram utilizados apenas para comprovar tendências observadas nos resultados obtidos com as amostras GAB 10 e GAB 20. Por este motivo, os corpos-de-prova de GAB 30 não foram submetidos às caracterizações por difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura nem análise termogravimétrica, mas apenas aos ensaios de caracterização ou determinação de propriedades físicas.

Os corpos-de-prova foram colocados sobre um tijolo refratário adequado para evitar a contaminação do refratário do forno.

A Tabela 06, a seguir, apresenta o esquema de sinterização utilizado:

**Tabela 06** - Amostras sinterizadas.

Amostra	1150°C	1170°C	1200°C
GAB 0	X	X	X
GAB 10	X	X	X
GAB 20	X	X	X
GAB 30	X	X	X

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Para a caracterização das amostras foram utilizadas as seguintes técnicas: Difração de Raios-X, Fluorescência de Raios-X, MEV, ATG.

### 3.3.1. Difração de Raios-X

Os dados de Difração de Raios-X foram obtidos à temperatura ambiente  
m m m  
m m 2θ m  
passe de 0,02° e tempo de medida de cada ponto de 1s. Foram realizados testes de DRX nos corpos-de-prova de GAB 10 e GAB 20 nas temperaturas de 1150 e 1170°C, bem como no pó do produtos da combustão do carvão mineral.

### 3.3.2. Fluorescência de Raios-X

Os testes de fluorescência de raios-X foram realizados com amostras do pó do granito Asa Branca e do produto da combustão do carvão mineral a fim de saber sua composição química, utilizando um equipamento Rigaku, modelo ZSX Mini II (Figura 10) pertencente ao Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará.



**Figura 10** - Fluorescência de Raios-X/Rigaku (ZSX Mini II)

### 3.3.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As amostras foram fraturadas e em seguida recobertas com ouro na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. A análise micro-estrutural foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais -

LACAM, utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Philips XL30 Series. Foram analisados os corpos - de - prova de GAB 10 e GAB 20 nas temperaturas de 1150 e 1170°C.



**Figura 11** - MEV Philips XL30 Séries.

### **3.3.4. Análise Termogravimétrica**

Para a realização do experimento foi utilizado um equipamento TGA-50H Shimadzu, com uma variação de temperatura 20°C/min, na faixa de 25° a 1200°C, no laboratório de Termoanálise Ivo Giolito, do Departamento de Química da UFC. A Análise Termogravimétrica foi realizada em amostras de pós das matérias-primas (granito e produtos da combustão do carvão), bem como de pós das misturas de GAB 10 e GAB 20.

## **3.4. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS**

### **3.4.1. Contração superficial e mássica**

Os ensaios de contração superficial e mássica foram realizados nas amostras de GAB 0, GAB 10, GAB 20 e GAB 30 sinterizadas às temperaturas de 1150 e 1170°C. O ensaio de contração térmica linear está fundamentado na variação de volume da peça quando submetida à sinterização. Essa contração, embora se manifeste de uma forma tridimensional, é medida de forma linear e

é expressa na forma de um coeficiente (FÉLIX, 2001). A contração linear das peças, após sinterizadas, foi determinada por meio da equação abaixo:

$$\frac{\Delta d}{d_0} \% = \left( \frac{d_s - d_0}{d_0} \right) X 100 \quad (2)$$

Onde  $d_0$  é o diâmetro da peça verde e  $d_s$  é o diâmetro da peça após a sinterização.

A variação mássica das amostras após sinterizadas é dada pela equação abaixo:

$$\frac{\Delta m}{m_0} \% = \left( \frac{m_s - m_0}{m_0} \right) X 100 \quad (3)$$

Onde  $m_0$  é a massa da peça verde e  $m_s$  é a massa da peça sinterizada.

### 3.4.2 Absorção de água

Esta caracterização foi realizada nos corpos de prova de GAB 0, GAB 10, GAB 20 e GAB 30 sinterizadas às temperaturas de 1150 e 1170°C, a fim de determinar a absorção de água nas amostras de granito Asa Branca com adição de produtos da combustão do carvão mineral. Os corpos de prova foram secos em estufa a 110 °C por 24 horas e em seguida pesados em balança analítica de precisão. Logo, após os corpos-de-prova foram imersos em um recipiente contendo água destilada por 24 horas. Em seguida, estes corpos foram retirados e ligeiramente enxutos com uma flanela, sendo pesados novamente. Segundo a NBR 13818 (1997), a absorção de água é expressa percentualmente pela equação a seguir:

$$ABS(\%) = \left( \frac{A - B}{B} \right) X 100 \% \quad (4)$$

Onde A é a massa do corpo de prova úmido e B é a massa do corpo de prova seco (saturado).

### 3.4.3. Dureza

O teste de microdureza Vickers foi realizado nos corpos de prova de GAB 0, GAB 10, GAB 20 e GAB 30 sinterizados às temperaturas de 1150 e 1170°C. Para as medidas dos ensaios utilizou-se um microdurômetro denominado SHIMADZU HMV no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM). Aplicou-se uma carga para indentação de 980,7 mN durante 10 segundos. A equação para a determinação da dureza é dada abaixo:

$$H_v = 1.8544 \left( \frac{P}{d_v^2} \right) \quad (5)$$

Neste teste foi realizado o cálculo do desvio padrão e do coeficiente de variação para que possa dar uma sustentação nos valores obtidos.



**Figura 12** - Microdurômetro Shimadzu HMV.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

---

Os ensaios foram realizados apenas nos discos que apresentaram a superfície vitrificada após a queima. A razão para isso é que a vitrificação da superfície é a evidência de que a sinterização do resíduo de granito foi concluída e que os poros foram preenchidos por uma fase vítrea. A grande quantidade de fundentes garantiu um ponto de fusão em temperaturas mais baixas (<1200 °C), o que implica menor consumo de energia elétrica. A cor escura (marrom avermelhada) é muito provavelmente resultado da presença de óxido de ferro na massa cerâmica. Portanto, não foram testadas as amostras GAB 10 (1200° C), GAB 20 (1200°C) e GAB 30 (1200°C), pois estas não vitrificaram ou expandiram (fundiram).

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

#### 4.1.1 Fluorescência de Raios-X

O resultado da composição química por fluorescência de Raios-X, em percentual mássico, na forma de óxido está descrito nas tabelas 07 e 08 apresentadas a seguir.

Foram analisadas as composições do resíduo do granito Asa Branca e dos resíduos sólidos gerados pela combustão do carvão.

**Tabela 07** - Composição química do Granito Asa Branca.

Componente	Massa (%)
SiO <sub>2</sub>	78,47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,63
K <sub>2</sub> O	5,33
CaO	1,47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,76
SO <sub>3</sub>	0,14
MnO	0,09
Rb <sub>2</sub> O	0,05

De acordo com Lobo (2009) os altos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  obtidos são típicos de rochas ígneas graníticas. Verifica-se que a matéria-prima é essencialmente constituída por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ .

Cabral (2009) afirma que alto teor de óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) associado a um teor considerável de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) garantem um ponto de fusão em temperaturas mais baixas. Esta característica é desejável, tendo em vista que quanto menor a temperatura de processamento, menor será o consumo energético e, conseqüentemente, menor o custo de fabricação.

Outro ponto importante diz respeito à  $\text{SiO}_2$ , que está associada com a fase cristalina do quartzo. É utilizada em massas cerâmicas com as funções de reduzir a plasticidade da massa, aumentar a permeabilidade e elevar o ponto de fusão. O óxido de alumínio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , apresenta alto ponto de fusão, proporcionando uma fase líquida de alta viscosidade e/ou uma fase líquida transiente, o que é desejável para a obtenção de produtos com melhores propriedades físicas e mecânicas. É utilizado em massas cerâmicas com as funções de reduzir a plasticidade da massa, aumentar a permeabilidade, além de elevar o ponto de fusão.

**Tabela 08** - Composição química dos produtos da combustão do carvão mineral.

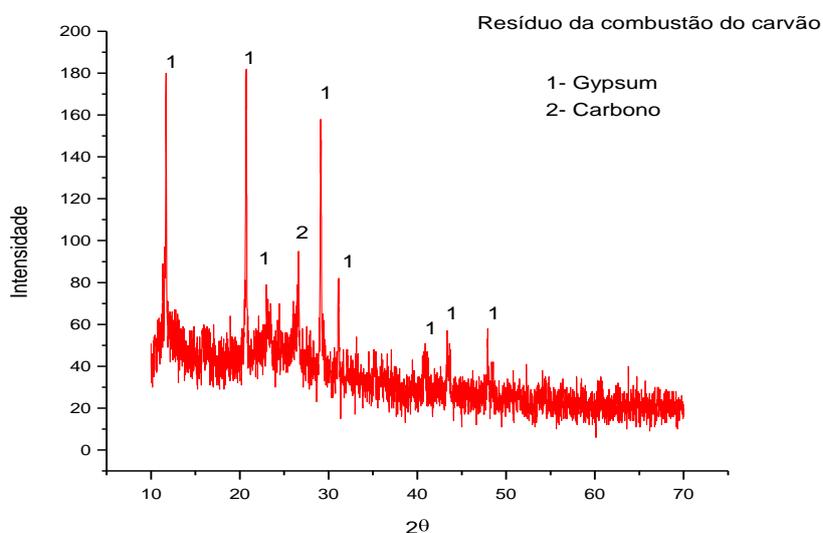
Componente	Massa (%)
Si	37,14
Ca	21,86
Al	14,69
S	8,70
K	2,96
Ti	2,46
Cl	1,61
P	0,31

Por se tratar de uma mistura de diferentes tipos de produtos (cinzas volantes, leite de cal e gesso do FGD) cuja composição exata não foi informada

pela empresa fornecedora do material, a análise do resultado da fluorescência precisa levar em conta os resultados da difração de raios-X. Observa-se, no entanto, uma grande quantidade de Si, Ca e Al, característica de matérias-primas adequadas à fabricação de cerâmicas, e um alto teor de enxofre, que é sempre uma preocupação, devido à possibilidade de reações expansivas que podem danificar as peças, ou mesmo a efeitos toxicológicos (SAMPAIO, 2002).

#### 4.1.2 Difração de Raio-X

A Figura 13, a seguir, apresenta o difratograma dos produtos gerados pela combustão do carvão.

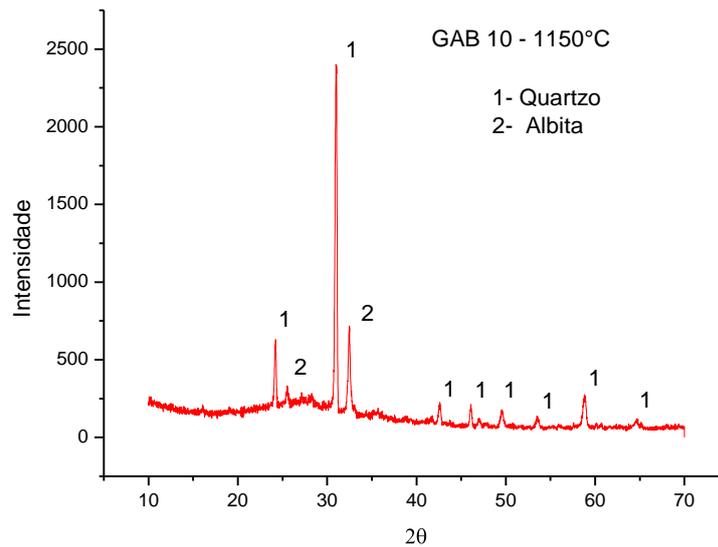


**Figura 13-** Difração dos produtos sólidos da combustão do carvão mineral.

De acordo com a análise de raios-X, as fases presentes nos produtos sólidos da combustão do carvão mineral são: o gesso (sulfato de cálcio hidratado,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e o carbono.

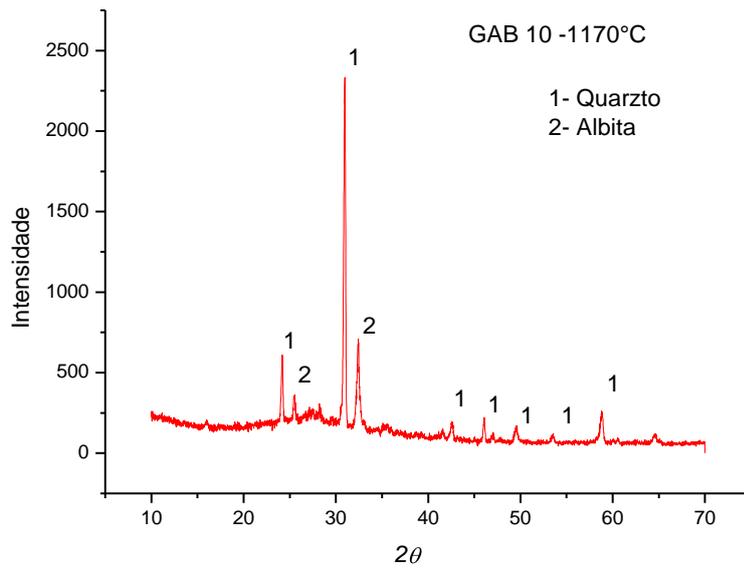
Na Figura 14 é apresentado o difratograma da amostra de GAB 10 sinterizada à temperatura de 1150°C. As fases presentes foram o Quartzo e a Albita. Estas fases são de grande importância na fabricação de revestimento cerâmicos, pois exercem funções ao longo do processamento cerâmico, influenciando nas características finais do produto (CABRAL, 2009).

O quartzo é o mineral mais abundante da terra, tem elevada dureza e alto ponto de fusão (aproximadamente 1650°C). Durante a queima, o Quartzo atua como fase inerte. Por outro lado, a Albita é um feldspato, que tem a função de fundente, atua como um componente formador da fase vítrea em corpos cerâmicos, e auxilia na diminuição da porosidade entre as partículas, além de aumentar a densidade relativa do material.



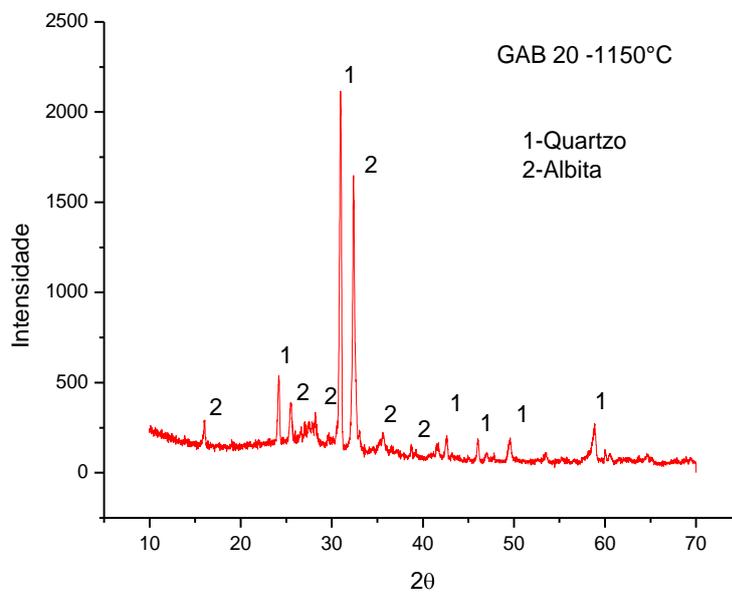
**Figura 14-** Difração de raios-X –GAB 10 (1150°C).

O difratograma da Figura 15, para a amostra contendo 10% de produtos da combustão sinterizada a 1170°C mostra que não ocorreu nenhuma alteração entre as amostras queimadas às temperaturas de 1150 e 1170°C.



**Figura 15-** Difração de raios-X –GAB 10 (1170°C).

O difratograma da amostra contendo 20% de produtos da combustão (Figura 16) mostra um pico mais intenso de Albita, provavelmente devido à grande quantidade de Ca(Cálcio) presente no resíduo.

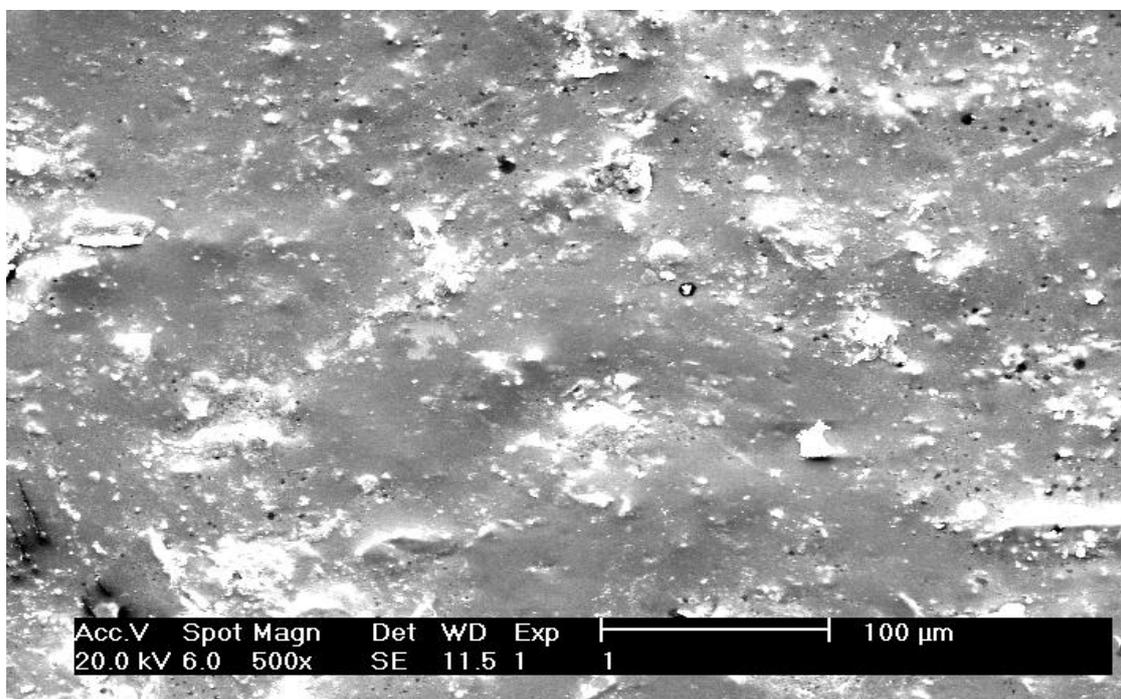


**Figura 16 -** Difração de raios-X – GAB 20 (1150°C).

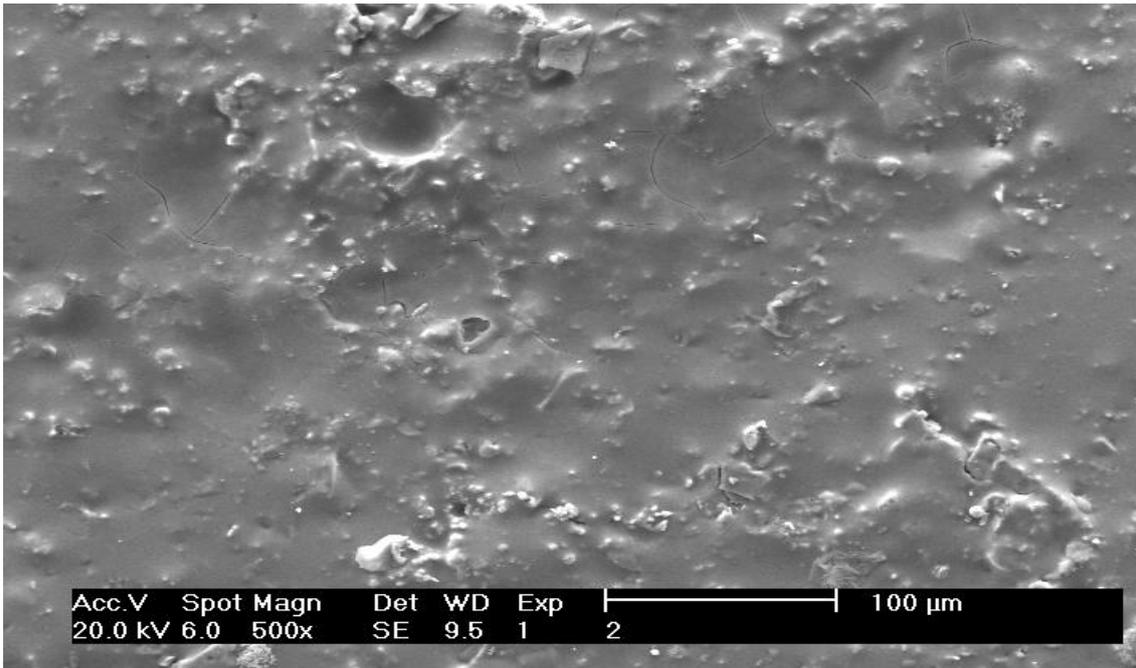
#### 4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV):

Todas as peças sinterizadas às temperaturas de 1150 e 1170°C apresentam aspecto superficial vítreo brilhante, sem evidência de porosidade superficial. Para realizar a visualização por microscopia eletrônica, as amostras foram fraturadas e as superfícies das fraturas foram analisadas, depois de recobertas com ouro.

As micrografias das amostras de granito Asa Branca contendo 10 e 20% de produtos da combustão do carvão mineral (GAB 10 e GAB 20, respectivamente), sinterizadas à temperatura de 1150°C durante 1h, são mostradas nas Figuras 17 e 18. Da comparação entre elas verifica-se que a amostra GAB 20 aparenta ser mais densa, com uma menor porosidade visível que a GAB 10. Observa-se, ainda, a presença de trincas na amostra de GAB 20, semelhantes às trincas que surgem quando da fratura de vidros.

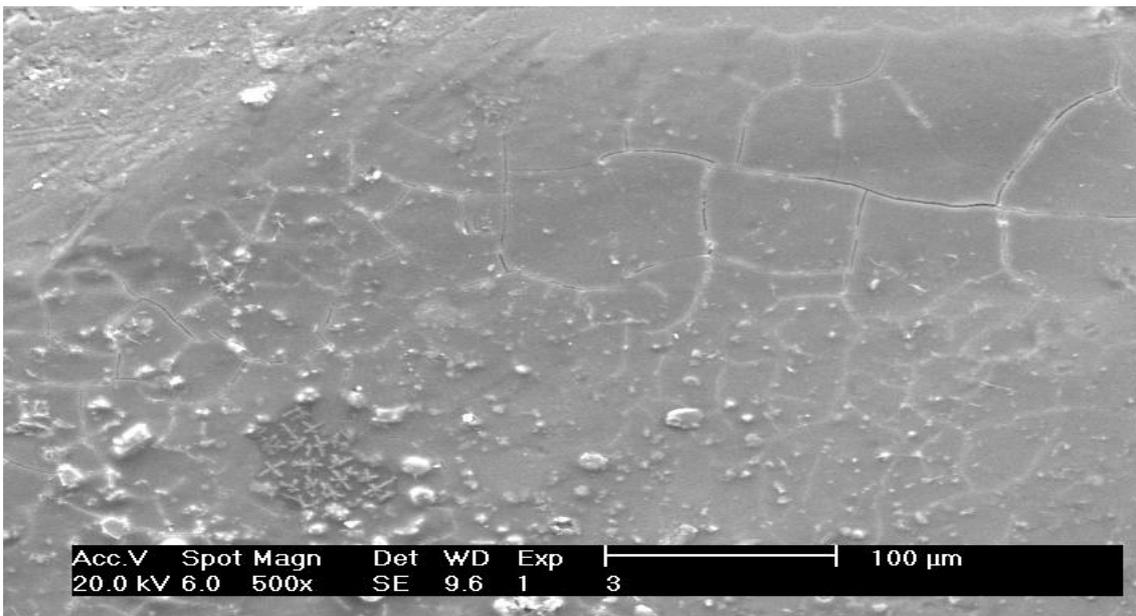


**Figura 17** - GAB 10 sinterizado a 1150°C.

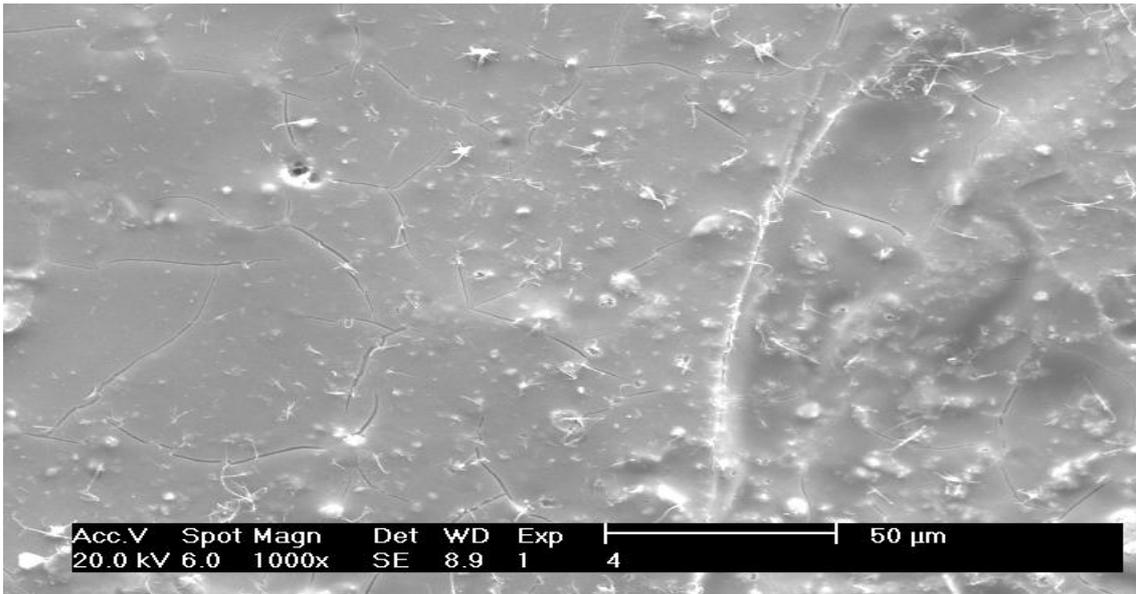


**Figura 18-** GAB 20 sinterizado a 1150°C.

As peças sinterizadas a 1170°C apresentam-se mais vitrificadas que as sinterizadas a 1150°C, o que pode ser evidenciado pelo surgimento de trincas na amostra de GAB 10 (Figura 19) e pela maior quantidade de trincas geradas durante a fratura do GAB 20 (Figura 20).



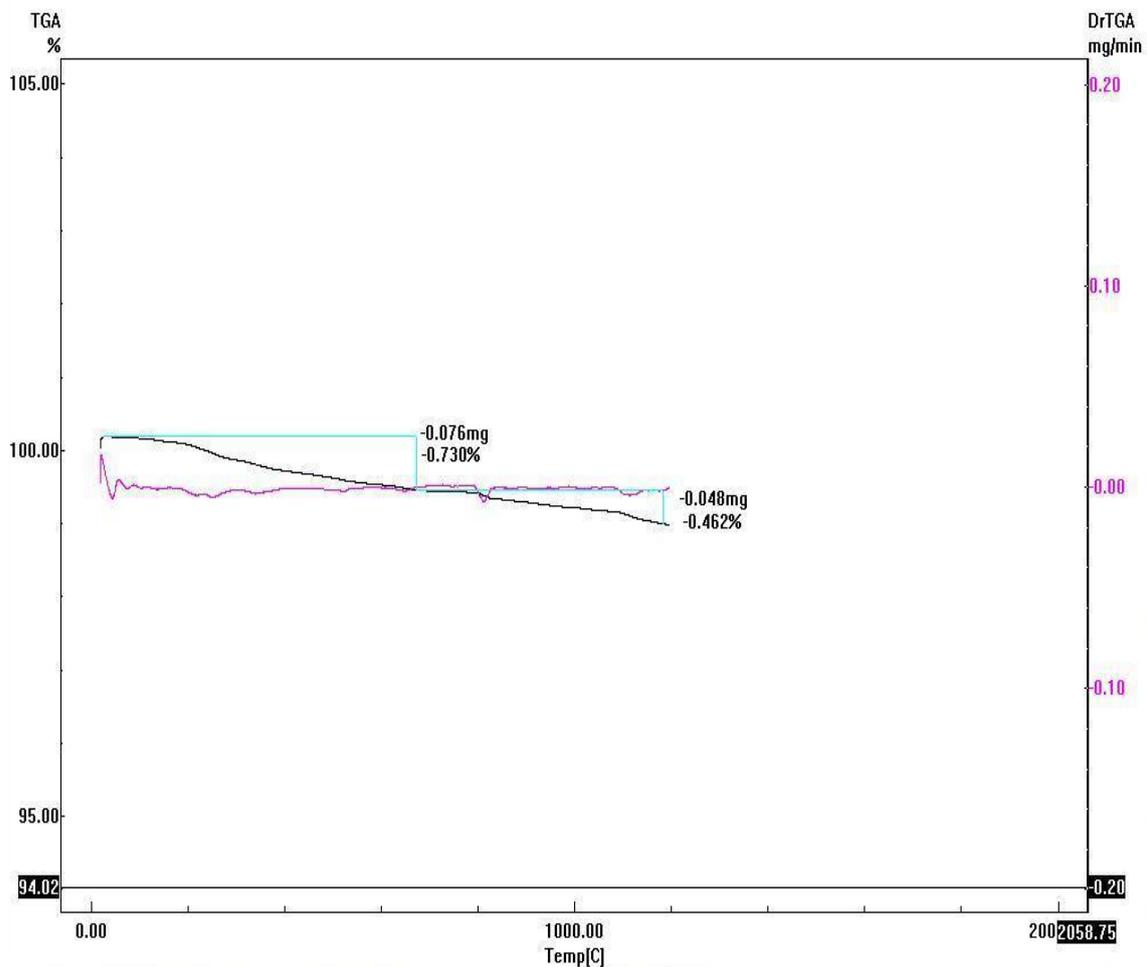
**Figura 19 -** GAB 10 sinterizado a 1170°C.



**Figura 20-** GAB 20 sinterizado a 1170°C.

#### **4.1.4 Análise Termogravimétrica:**

Os materiais utilizados (granito e produtos da combustão do carvão) bem como as suas misturas (GAB 10 e GAB 20) foram submetidos a análise termogravimétrica, não só para verificar a perda de massa com a variação da temperatura, como também para orientar a programação do forno para a sinterização dos corpos-de-prova. A Figura 21 mostra o resultado da ATG do resíduo do granito puro.



**Figura 21** - ATG do Granito puro.

Foram observados dois intervalos de variação mássica. No primeiro, ocorrido aproximadamente entre 25 e 800°C, a amostra de Granito Asa Branca puro teve uma redução de 0,730%, enquanto que no segundo (entre aproximadamente 800 e 1200°C), houve uma redução de 0,462%. A variação mássica total dessa amostra é de 1,192% entre 25 e 1200°C.

O ATG do produto da combustão do carvão mineral (Figura 22) mostra uma perda acentuada de massa, que é condizente com a composição química do material. Nesta amostra verifica-se que a perda de massa é mais acentuada em quatro faixas de temperatura. A primeira ocorreu entre 25 e 100°C, com um

percentual de 3,398%. A segunda variação, um pouco maior que a primeira, ocorreu entre 100 e 400°C, aproximadamente, e teve uma variação de 6,29%. Na terceira, que aconteceu entre 400 e 900°C, ocorreu a maior perda de massa, de 13,527%. A última variação verificou-se entre 900 e 1200°C, e foi de 6,918%. Assim, os resíduos sólidos obtidos da combustão do carvão mineral apresentaram uma grande perda de massa (30,133%) quando submetidos a uma variação de temperatura.

Os produtos da combustão do carvão mineral possuem elementos/compostos de baixo ponto de fusão, e assim, quando submetidas a temperaturas elevadas, ocorre uma grande perda de massa por evaporação.

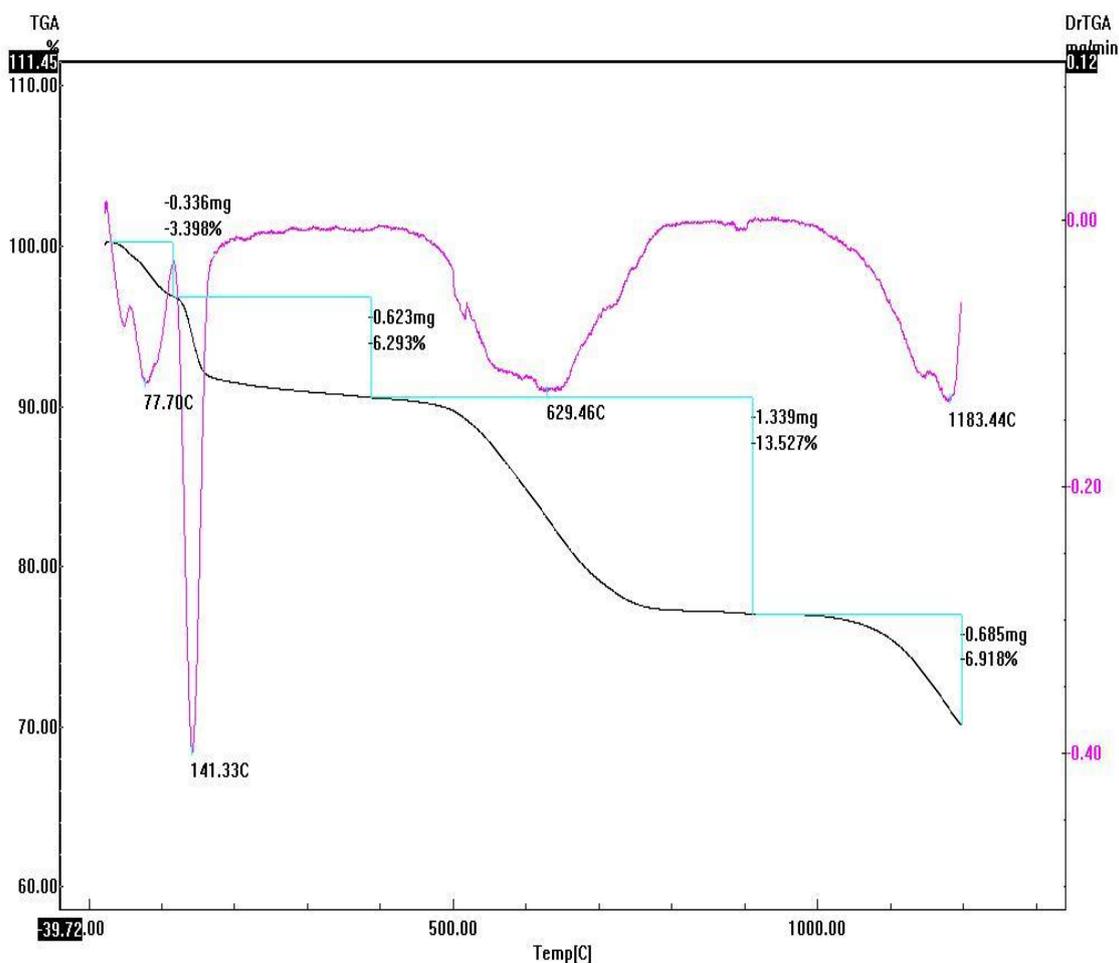
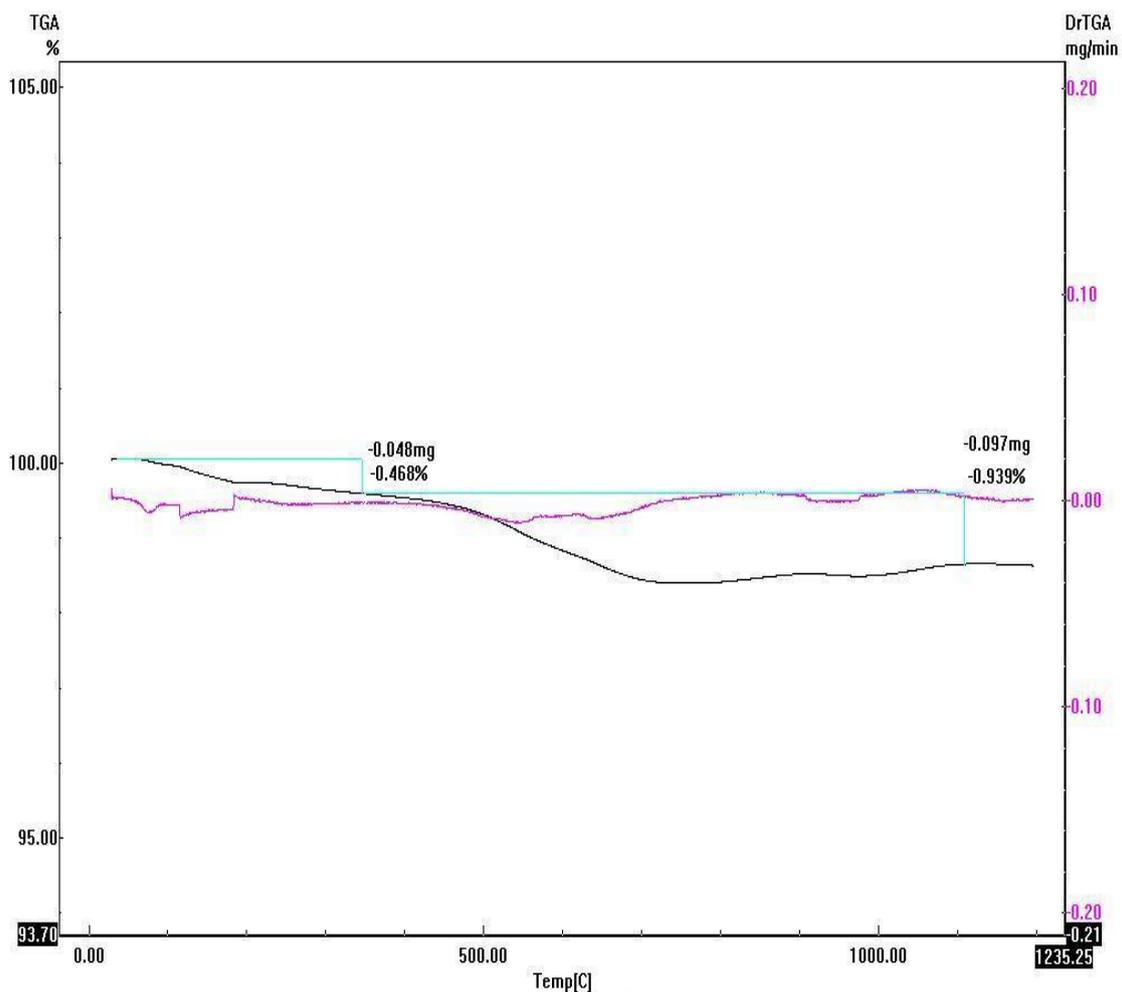


Figura 22- ATG do produto da combustão do carvão mineral

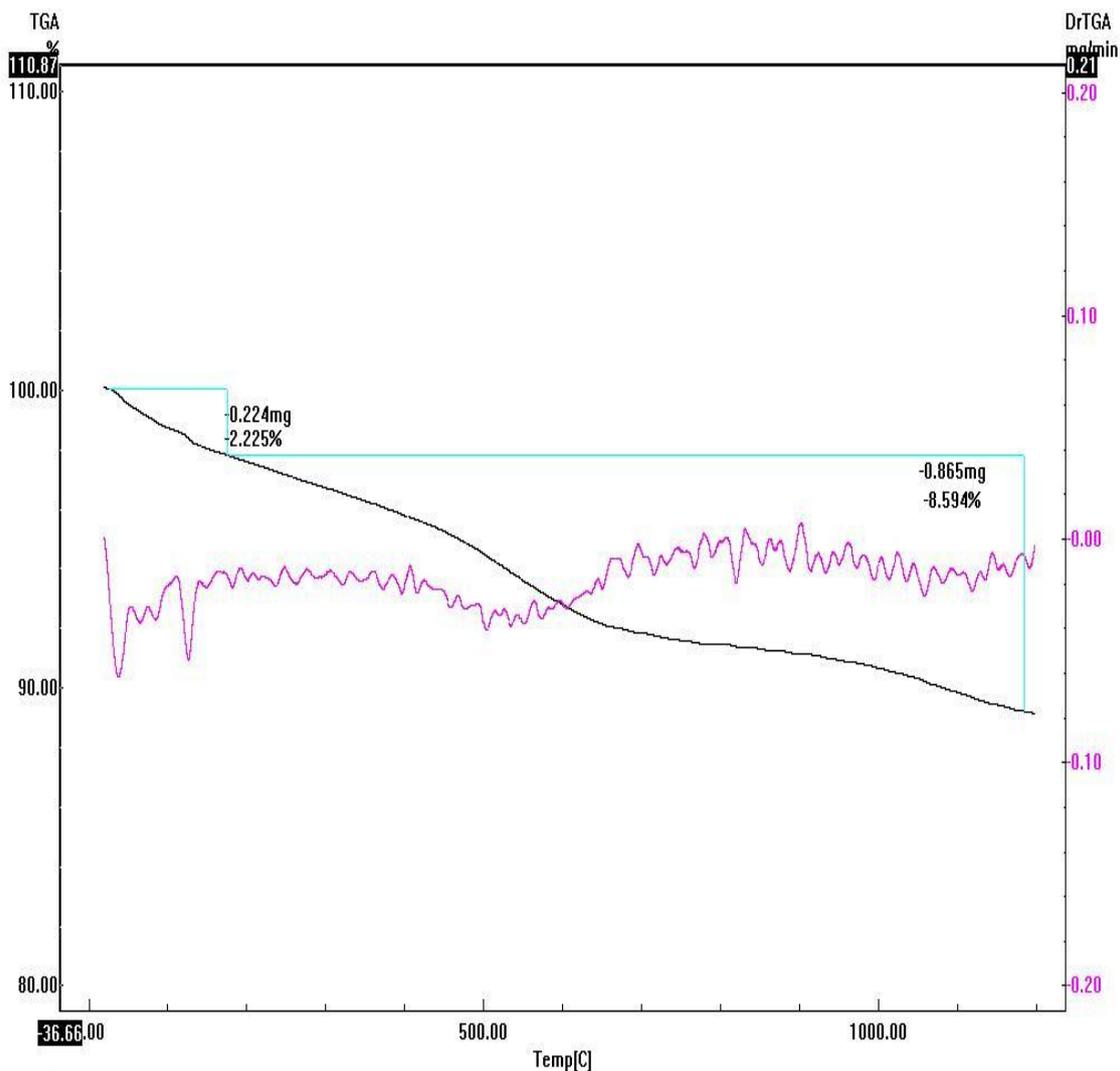
A Figura 23 apresenta a ATG do GAB 10, onde se pode observar a existência de dois intervalos de variação mássica. No primeiro, ocorrido aproximadamente entre 25 e 400°, C a amostra sofreu uma redução de 0,468%, enquanto, no segundo (aproximadamente entre 400 e 1100°C), ocorreu uma redução de 0,939% :



**Figura 23** - ATG do GAB 10.

A variação mássica total dessa amostra é a soma das duas variações mássicas, ou seja, 1,407%, ocorridas entre 25 e 1100°C. Assim, houve um aumento da variação mássica em relação ao Granito Asa Branca puro.

Por fim, a Figura 24 apresenta o resultado da ATG do GAB 20. Nesta amostra houve duas variações mássicas, a primeira ocorreu entre 25 e 200°C, com um percentual de 2,225%. A segunda variação, maior que a primeira, ocorreu entre aproximadamente, 200 e 1200°C, e teve uma variação de 8,594%.



**Figura 24** - ATG do GAB 20.

A perda de massa total é 10,819% Nota-se que a perda de massa do GAB 20 em relação ao Granito puro e ao GAB 10 é maior, e isso se deve ao

fato de possuir uma maior concentração de produtos da combustão do carvão mineral.

## 4.2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

### 4.2.1 Contração mássica

A Tabela 09 mostra os resultados deste experimento para GAB 10 (1150 e 1170°C), GAB 20 (1150 e 1170°C) e GAB 30 (1150 e 1170°C), o resultado está expresso em percentagem.

**Tabela 09** - Resultado de contração mássica

Temperaturas Amostras	1150°C	1170°C
GAB 0	2,62%	3,10%
GAB 10	3,58%	5,85%
GAB 20	5,87%	6,27%
GAB 30	8,16%	8,21%

A maior contração mássica ocorreu nos corpos-de-prova contendo 30 % de produtos da combustão do carvão na temperatura de 1170 °C, enquanto a menor retração se verificou para os corpos-de-prova que não continham resíduo de carvão e que foram sinterizados a temperaturas mais baixas (0 % de produtos da combustão do carvão mineral a 1150°C).

Pode-se perceber que ao adicionar produtos da combustão do carvão mineral na matriz-cerâmica, haverá uma maior contração mássica, devido as cinzas, presentes no resíduo da combustão, possuírem substâncias com baixo ponto de fusão. Além disso, foi notado que a retração mássica aumentou com a temperatura, o que é indício de uma maior densificação ou melhor sinterização.

#### 4.2.2 Contração linear

De uma maneira análoga à exposição dos resultados da retração mássica, a tabela 10 mostra os resultados deste experimento para o GAB 0 (1150 e 1170°C), GAB 10 (1150 e 1170°C), GAB 20 (1150 e 1170°C) e GAB 30 (1150 e 1170°C). O resultado também está exposto em termos de percentagem.

**Tabela 10-** Resultado da contração linear

Temperaturas Amostras	1150°C	1170°C
GAB 0	10,25%	10,79%
GAB 10	10,88%	10,98%
GAB 20	11,61%	11,73%
GAB 30	12,90%	12,07%

Foi verificado que à medida que aumentou a concentração de produtos da combustão do carvão em relação à matriz-cerâmica, houve uma maior contração linear. Do mesmo modo, foi verificado que à medida que se aumentou a temperatura para uma dada concentração também houve uma maior contração linear.

#### 4.2.3 Absorção de água

O teste da absorção de água foi feito com as amostras GAB 10 (1150 e 1170°C), GAB 20 (1150 e 1170°C) e GAB 30 (1150 e 1170°C). A seguir segue a tabela 11 com este resultado:

**Tabela 11 – Resultado da Absorção de água.**

Temperaturas Amostras	1150°C	1170°C
GAB 0	0,07%	0,06%
GAB 10	0,06%	0,08%
GAB 20	0,18%	0,08%
GAB 30	0,05%	0,06%

Os resultados de absorção de água para as amostras da mistura de granito e produtos da combustão do carvão mineral podem ser enquadrados em baixa absorção, ou seja, menor que 0,5% podendo ser classificados, segundo a absorção de água, em Grês-porcelanato de acordo com NBR 13818

(1997). Além disso, Vidal (1999) afirma que a absorção do granito Asa Branca puro é 1, 140 %, bem maior do que os resultados encontrados neste trabalho.

#### 4.2.4 Microdureza Vickers

O teste de Microdureza Vickers foi realizado nas amostras de GAB 10 (1150 e 1170°C), GAB 20 (1150 e 1170°C) e GAB 30 (1150 e 1170°C), como mostra a tabela 12 a seguir. O resultado é dado em  $HV_{0,1}$ .

**Tabela 12 - Resultado da Microdureza Vickers**

Temperaturas Amostras	1150°C	1170°C
GAB 0	417	424
GAB 10	630	677
GAB 20	675	750
GAB 30	638	683

À medida que aumentou a temperatura para uma determinada concentração, houve um aumento da Microdureza Vickers. Foi verificado também, que à medida que aumentou a concentração de produtos da combustão do carvão mineral em relação à matriz cerâmica, houve um acréscimo na Microdureza Vickers. Entretanto, esta última observação foi relatada até uma composição de 20%p, pois com uma concentração de 30%p, houve um decréscimo.

## 5. CONCLUSÕES:

---

De acordo com a realização deste estudo, através da mistura de produtos da combustão do carvão mineral e do Granito Asa Branca, avaliou-se a microestrutura e algumas propriedades mecânicas e físicas das peças fabricadas com este material, constatando que:

- O uso dos produtos da combustão do carvão mineral como fase - reforço no Granito Asa Branca é bastante viável.
- Através de teste de fluorescência de raios-x, verificou-se que os principais componentes do Granito Asa Branca são Silício, Alumínio, Potássio, Cálcio e dos produtos da combustão do carvão mineral Silício, Cálcio, Alumínio e Enxofre
- As principais fases observadas através dos testes de difração de raios-x no GAB 10 (1150 e 1170°) e GAB 20 (1150 e 1170°C) são: Quarzo e Albita.
- O teste de Análise Termogravimétrica mostrou que, em relação ao granito puro, as amostras de GAB 10 e GAB 20 sofreram uma maior variação mássica
- No teste de contração mássica a menor retração foi no GAB 0 (1150°C) com um valor de 2,62%, enquanto a maior foi no GAB 30 (1170°C) com 8,21%.
- No ensaio de contração superficial a menor retração foi no GAB 0 (1150°C) com um valor de 10,25%, enquanto a maior foi no GAB 30 (1170°C) com 12,07%.
- De acordo com o teste de absorção de água, as amostras podem ser enquadrados em baixa absorção, ou seja, menor que 0,5% podendo ser classificados, segundo a absorção de água, em Grês-porcelanato.
- No teste de dureza à medida que aumentou a temperatura para uma determinada concentração, houve um aumento da Microdureza Vickers.

### **5.1. Sugestões para futuros trabalhos**

- Realizar ensaios de flexão e compressão diametral em amostras prismáticas com maiores dimensões.
- Confeccionar corpos de provas com maiores concentrações de fase reforço.
- Usar outro tipo de matriz cerâmica na confecção dos corpos de provas.
- Verificar a influência da granulometria nas propriedades físicas do material

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

---

ABCM- Associação Brasileira do Carvão Mineral. 2009. **Carvão Mineral**. Disponível em: <[http://www.carvaomineral.com.br/abcm/sobre\\_carvao.asp](http://www.carvaomineral.com.br/abcm/sobre_carvao.asp)> Acesso em: 01/05/2009.

ALBUQUERQUE, J. S. V. **Produção de cerâmicas bioativas porosas de apatitas nanométricas para aplicações biomédicas**. 2004.110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Ceará.

AZZOLINI, M. **Restauração ecológica de áreas impactadas por cinzas de carvão mineral: contribuição da Mamona (*Ricinus communis* L.) e respostas da espécie a metais pesados**. 2008. 195f. Tese (Doutorado em Botânica) – Curso de Pós-Graduação em Botânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Biociências, Rio Grande do Sul.

Carvão Mineral. 2003. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao%282%29.pdf>> Acesso em: 01/05/2010.

Carvão Mineral. 2010. Disponível em: <<http://cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1A/carvao.html>> Acesso em: 01/02/2010.

Carvão Mineral. 2009. Disponível em: <[http://www.riobranco.org.br/arquivos/sites2008/13\\_agosto/grupo5/Carv%E3o%20mineral.htm](http://www.riobranco.org.br/arquivos/sites2008/13_agosto/grupo5/Carv%E3o%20mineral.htm)> Acesso em: 23/05/2010.

CABRAL, D. H. P. **Uso de rejeitos do granito rain forest para a produção de revestimentos Cerâmicos com baixa absorção de água**. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) –

Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Ceará.

DESCHAMPS, R.J. Using FBC stoker ashes as roadway fill: a case study. ***Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering***.p.1120-7.1998.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: **Seminário – reciclagem de resíduos sólidos domiciliares**.2000. São Paulo 2-13.

FÉLIX, P. C. G.; **Estudo da Viabilidade Técnica da Moldagem por Injeção a Baixas Pressões de Pó Residual de Granito**. 2001. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Ceará.

FERNANDES, P.F.; OLIVEIRA, A.P.N.; HOTZA, D. Reciclagem do Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes de uma Indústria de Revestimentos Cerâmicos. Parte 1: Ensaio Laboratoriais. ***Cerâmica Industrial***. v.8; n.2; 2003.

FERRET, L. S. **Zeólitas de cinzas de carvão: síntese e uso**. 2004. 154f. Tese (Doutorado em Botânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Rio Grande do Sul.

GUERRA, A. J.; GUERRA, A. J. T.. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil.1997. 648p.

LEANDRO, R. P. **Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis**. 2005. 195f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Paulo. Universidade de São Paulo. São Paulo.

EROL, M.; KUÇUKBAYRAK, S.; ERSOY-MERIÇBOYU, A. Characterization of sintered coal fly ashes. *Fuel* . v.87 p.1334–40. 2008.

LEITE, J. P. **Caracterização microestrutural de Compósitos M2 / (FeNbc) visando geração de gás por eletrólise.** 2005. 78f. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa.

LOBO, C. J. S. **Estudo sobre a utilização do rejeito granito Rosa Iracema como matéria-prima na fabricação de funis de saída da fiação a rotor na indústria têxtil.** Fortaleza: Dissertação de Mestrado, UFC, 2009.

MARTINS, J. L.. **Aproveitamento de cinza de carvão mineral na agricultura.** 2001. 128f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

MATERIAIS CERÂMICOS. 2005. Disponível em:  
<[http://www.poli.usp.br/d/pmt2100/Aula10\\_2005%201p.pdf](http://www.poli.usp.br/d/pmt2100/Aula10_2005%201p.pdf)> Acesso em:  
01/05/2010.

MELLO, R. M. de. **Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granito como matéria - prima em cerâmica vermelha.** 2006. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações Materiais) – INEP/Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-Autarquia Associada a Universidade de São Paulo, São Paulo.

MENEZES, R.R.; NEVES, G. de A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental.*, v.6; n.2; p.303-313, 2002.

MORAES, M<sup>a</sup>. C. C. de S. e B. de; **Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Compósitos Alumina-Zircônia para Próteses Dentárias**. 2004. 256f. Proposta de Tese (Doutorado em Engenharia). Curso de Doutorado em Ciências dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro.

MORAES, M. L. V. N. de. **Aproveitamento de resíduo de beneficiamento do caulim na produção de porcelanato cerâmico**. 2007. 153f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais). Curso de Pos – Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio grande do Norte. Natal.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. **Cerâmicas**. v.49; p. 262-267. 2003.

MOTTA, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis – o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambiente & Sociedade**. v. XI; n. 1; p.167-184; 2008.

NITIVATTANANON, V.; GAUGER, R.. Enhancing efficiency of local government authorities for solid wastemanagement facilities. In: World environment congress and exhibition, 2004, Roma, Italia, 17–21 Outubro. 2004

PAPROCKI, A. et al . Caracterização de cinzas leves oriundas da combustão de carvão pulverizado visando sua aplicação na síntese de zeólitas. In: XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 2008, Porto de Galinhas/PE. XVII CBECiMat, 2008. p. 676-687.

QUERALT, I. **et al.** Use of coal fly ash for ceramics: a case study for a large Spanish power station. **Fuel**. v. 76; n.8; p.787–791; jun; 1997.

REED, J. S. **Introduction to the principles of ceramic processing**. New York: John Wiley & Sons, 1988.

RIBEIRO, M. J. P.M. ABRANTES, J. C. C. Moagem em Moinho de Bolas: Estudo de algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo. **Cerâmica Industrial**. v.6; n.2; 2001.

REIJNDERS, L. A normative strategy for sustainable resource choice and recycling. **Resources, Conservation and Recycling**. v.28; p.121–133; 2000.

SAMPAIO, J. A. *et al*; Comunicação técnica elaborada para o livro Usina de Beneficiamento de Minérios do Brasil. **CT2002-162-00**- Centro de Tecnologia Mineral; Rio de Janeiro. 2002.

SANTIAGO Jr., G. R. **Estudos sobre a utilização de resíduos do beneficiamento do Alumínio como matéria-prima cerâmica**. 2008. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Ceará.

SANTOS, R. P. dos. **Preparação e caracterização de cerâmicas de cinzas de carvão mineral**. 2003. 113f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Curso de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Ceará, Ceará.

SALLES, M. C. F. de. **Fabricação de compósitos com matriz de alumina reforçada com whiskers de mulita**. 2008. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Curso de Pós – Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. Rede Temática em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais.

SILVA, J. B. **et al.** Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**.v. 51; p. 325-330. 2005.

SILVA, N. I. W. da **et al.** Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. **Cerâmica**. v.45; n. 296; São Paulo; nov.-dez. 1999.

SUTTIBAK, S.; NITIVATTANANON, V. Assessment of factors influencing the performance of solid waste recycling programs. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 53; p.45–56; 2008.

TAM, V. W. Y. ; TAM, C. M. ; A review on the viable technology for construction waste recycling. **Resources, Conservation and Recycling**. v.47; p.209–221; 2006.

VARGAS, A.S.; **et al.** Cinzas volantes álcali-ativadas com solução combinada de NaOH e Ca(OH)<sub>2</sub>. **Revista Matéria**. v. 12; n. 3; p. 462 – 69, 2007.

VIDAL, F. W. H., BESSA, M. F., LIMA, M. A. B. Avaliação de rochas ornamentais do Ceará através de suas características tecnológicas, **CETEM/MCT, Série Tecnologia Mineral**. v. 74;1999.

WYSZOMIRSKI, P.; BRYLSKA, E. Fly ash in Polish building ceramics threat or proecology? **Applied Geochemistry**, v.11; n.1-2; p. 351-53; jan-mar; 1996.

YANG. G. C.C.; Urban waste recycling in Taiwan. **Resources, Conservation and Recycling**. v.13; p.15-26; 1995.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)