

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE SERRAGEM DE  
MADEIRA NA PRODUÇÃO DE PISO CERÂMICO VITRIFICADO

**FERNANDA PEIXOTO DA SILVA GOMES**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO – 2016

# VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE SERRAGEM DE MADEIRA NA PRODUÇÃO DE PISO CERÂMICO VITRIFICADO

**FERNANDA PEIXOTO DA SILVA GOMES**

“Dissertação de mestrado apresentada ao corpo docente do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais.”

Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

AGOSTO – 2016

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

170/2016

Gomes, Fernanda Peixoto da Silva

Valorização de resíduo de cinza de serragem de madeira na produção de piso cerâmico vitrificado / Fernanda Peixoto da Silva Gomes. – Campos dos Goytacazes, 2016.

xxi, 86 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançado. Campos dos Goytacazes, 2016.

Orientador: José Nilson França Holanda.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

Bibliografia: f. 76-86.

1. CINZA DE SERRAGEM DE MADEIRA – REAPROVEITAMENTO (SOBRAS, REFUGOS, ETC.) 2. RESÍDUOS 3. RECICLAGEM 4. PISO VITRIFICADO I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II. Título

CDD	660.2
-----	-------

# VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE SERRAGEM DE MADEIRA NA PRODUÇÃO DE PISO CERÂMICO VITRIFICADO

**FERNANDA PEIXOTO DA SILVA GOMES**

“Dissertação de mestrado apresentada ao corpo docente do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais.”

Aprovada em 11 de Agosto de 2016.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Sidnei José Gomes Sousa (D.Sc, Engenharia de Materiais) – FAETEC/CAMPOS

---

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (PhD.SC. Engenharia Mecânica) – UENF/CCT

---

Prof.<sup>a</sup> Márcia Giardinieri de Azevedo ( D.Sc. Engenharia Química) – UENF/CCT

---

Prof. José Nilson F. de Holanda ( D.Sc, Engenharia e Ciência dos Materiais)

Orientador – UENF / CCT

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus pela força, saúde, proteção e oportunidade para que eu pudesse superar os obstáculos encontrados durante esta caminhada.

A minha filha, aos meus pais, meus irmãos, meu sobrinho e ao meu cunhado, pelo carinho, apoio e por estarem sempre presentes em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelo amor e proteção.

A minha mãe Josélia Azevedo Peixoto do Rosário e ao meu pai Fernando da Silva por me incentivarem a realizar meu sonho.

A minha filha Maria Clara Peixoto Carvalho Gomes por seu apoio e pela sua compreensão pelo tempo que estive ausente para realizar este trabalho.

A minha irmã Priscilla Peixoto da Silva Medeiros e meu irmão Fernando da Silva Filho que me apoiaram e torceram por mim.

Ao meu cunhado Ângelo da Silva Medeiros pelo apoio.

Ao meu professor e orientador José Nilson França de Holanda pela confiança, ajuda e incentivo durante a realização desse trabalho.

Ao prof. D.Sc. Lúcio Terra Petrucci por ser o incentivador desta empreitada.

Ao prof. D.Sc. Sidnei José Gomes Sousa por ter sido o mediador entre o incentivo e a realização deste sonho.

A Arte Cerâmica Sardinha, representada por seu proprietário Rodolfo Gama, o qual forneceu o resíduo cinza da serragem de madeira.

Ao D.Sc. Mário César e Livia Pereira pelo incentivo e apoio em todos os momentos deste trabalho e de minha vida.

Ao D.Sc. Thiago Siqueira Pereira e Raquel Siqueira Pereira Ferreira pelo incentivo e ajuda em vários momentos.

A amiga Fernanda dos Santos Maia Luna por me apoiar e encorajar todo o tempo nos meus estudos, produção do projeto e na dissertação.

A Lara Pessin e Fabrício Bagli pela ajuda nos trabalhos.

A Isabela Oliveira R. Areias pelo apoio e por me ensinar a fazer os gráficos.

Ao amigo Fernando Luiz de Carvalho Silva pelos ensaios mecânicos.

A amiga Geovana Girondi Delaqua por sua companhia e ajuda em vários momentos.

Aos técnicos Milton Soares Pereira Júnior e Vanúzia A. dos Santos Ferreira pelos ensaios químicos, mineralógicos, de plasticidade e granulometria.

Aos amigos Elisangela, Michele, Lucas Amaral, Micaela Nicolite, Natália Oliveira, Renata Aquino, Layzza Tardin, Geanni Silveira, Nicolle Cabral, Carlos Alberto Guimarães, Carolina Araújo, pelo apoio e incentivo.

Aos técnicos Michel Picanço e Zulmira Alice Soares Guimarães por todo apoio e ajuda nos ensaios de MEV.

Ao técnico Gabriel nos ensaios de Raios X.

A UENF pela oportunidade e a Capes pelo apoio financeiro.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente colaboraram para que eu pudesse concluir a presente Dissertação de Mestrado, muito obrigada!

***“Por isso, vistam toda armadura de Deus, para que possam resistir no dia mau e permanecer inabaláveis, depois de terem feito tudo.” Efésios 6:13***

***“Por isso não temas, pois estou com você; não tenha medo, pois sou o seu Deus. Eu o fortalecerei e o ajudarei; eu o segurarei com minha mão direita vitoriosa.” Isaías 41:10***

***“Mil cairão ao teu lado; dez mil, à sua direita, mas nada o atingirá.” Salmos 91:7***





## **Sumário**

Lista de Figuras .....	xiv
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Fórmulas.....	xix
Resumo.....	xx
Abstract.....	xxi
<b>CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1– Aspectos Gerais .....	1
1.2 – Objetivos .....	3
1.3 – Justificativas .....	3
<b>CAPÍTULO 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1- Piso Cerâmico Vitrificado .....	5
2.2- Matérias-Primas para Revestimento Cerâmico .....	8
2.2.1 – Matérias-Primas plásticas .....	10
2.2.1.1- Plasticidade.....	11
2.2.1.2-Granulometria.....	13
2.2.2 - Matérias-Primas não plásticas .....	13
2.3 - Processos de Fabricação de Piso Cerâmico Vitrificado .....	15
2.3.1 - Preparação de matéria-prima.....	15
2.3.2 - Preparação das massas cerâmicas .....	15
2.3.3 - Moagem .....	16
2.3.3.1 - Moagem por via seca.....	16
2.3.3.2 - Moagem por via úmida.....	17
2.3.4 - Conformação das Peças .....	18

2.3.5 - Secagem .....	18
2.3.6 - Sinterização .....	19
2.4.- Sinterização e Microestrutura do Porcelanato.....	20
2.5 - Resíduos industriais e reciclagem.....	22
2.5.1- Angelim Pedra.....	25
2.5.2 - Peroba.....	25
2.5.3 - Resíduo da cinza .....	26
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1- Matérias-primas utilizadas.....	33
3.2 - Beneficiamento das matérias-primas .....	33
3.3 - Caracterização das matérias-primas.....	33
3.3.1 - Caracterização mineralógica.....	34
3.3.2 - Caracterização química.....	34
3.3.3 - Análise pozolânica da cinza da serragem de madeira.....	35
3.3.4-Teor de matéria orgânica(MO), sais solúveis, capacidade de troca catiônica(CTC) e pH da cinza da serragem de madeira.....	36
3.3.5 -Caracterização morfológica.....	36
3.4 - Formulação e preparação das massas cerâmicas.....	36
3.5 - Caracterização das massas cerâmicas.....	37
3.6 - Conformação dos corpos cerâmicos.....	38
3.7- Secagem dos corpos cerâmicos.....	38
3.8- Sinterização.....	39
4- Análises das Propriedades dos Corpos Cerâmicos Sinterizados.....	40
4.1 - Absorção de água .....	40

4.2- Massa específica aparente .....	41
4.3 - Porosidade Aparente .....	41
4.4 - Retração linear de queima.....	42
4.5 - Tensão de ruptura à flexão .....	42
<b>CAPÍTULO 4- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>43</b>
4.1- Caracterização das matérias-primas utilizadas.....	43
4.1.1.- Análise mineralógica das matérias-primas utilizadas.....	43
4.1.2.- Análise química das matérias-primas utilizadas.....	46
4.1.3.- Análise física das matérias-primas utilizadas.....	48
4.1.3.1.- Análise granulométrica das matérias-primas utilizadas.....	48
4.1.4.- Análise morfológica das matérias-primas utilizadas.....	51
4.1.5.- Análise térmica das matérias-primas utilizadas.....	54
4.1.6.- Análise da atividade pozolânica do RCSM.....	57
4.1.7.-Teor de matéria orgânica (MO), sais solúveis, capacidade de troca catiônica(CTC) e pH do RCSM.....	57
4.2 - Caracterização das massas cerâmicas incorporadas com resíduo cinza da serragem de madeira.....	58
4.2.1 - Análise granulométrica das massas cerâmicas.....	58
4.3 - Efeitos do resíduo de cinza de serragem de madeira (RCSM) nas propriedades tecnológicas de secagem.....	61
4.3.1- Avaliação das propriedades tecnológicas de secagem.....	61
4.3.2- Avaliação das propriedades após queima.....	63
4.4- Efeito da valorização do resíduo cinza da serragem de madeira (RCSM) nas peças cerâmicas após queima.....	70
4.5- Piso cerâmico vitrificado incorporado com resíduo cinza da serragem de madeira .....	71

<b>CAPÍTULO 5- CONCLUSÕES.....</b>	<b>73</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1</b> - Destino das exportações brasileiras 2014.....	6
<b>Figura 2.2</b> – Estrutura da Gibsita (a), Sílica (b). O processo de montagem da estrutura ideal da caulinita (c) e a estrutura final da caulinita (d). .....	11
<b>Figura 2.3</b> – Transformações polimórficas do quartzo.....	14
<b>Figura 2.4</b> - Esquema de preparação de massa cerâmica por via seca.....	16
<b>Figura 2.5</b> – Fluxograma do Processo de Fabricação de Revestimento Cerâmico..	18
<b>Figura 2.6</b> - Difratoograma de raios X da cinza da lenha. C = carbonato de cálcio, H = hidróxido de cálcio, P = fosfato de cálcio, Q = quartzo.....	28
<b>Figura 2.7</b> - Micrografias da cinza da lenha obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	28
<b>Figura 2.8</b> - DRX da CRLA.....	30
<b>Figura 2.9</b> - Curvas de DTA /TG da CRLA.....	31
<b>Figura 3.1</b> - Fluxograma da metodologia experimental.....	32
<b>Figura 3.2</b> - Difratoômetro de raios X modelo XRD7000, marca SHIMADZU.....	34
<b>Figura 3.3</b> - Equipamento modelo EDX – 700 – marca Shimadzu.....	35
<b>Figura 4.1</b> -Difratoograma de raios X do RCSM.....	43
<b>Figura 4.2</b> -Difratoograma de raios X do Caulim.....	44
<b>Figura 4.3</b> -Difratoograma de raios X do Quartzo.....	45
<b>Figura 4.4</b> -Difratoograma de raios X do Feldspato Sódico (albita).....	45
<b>Figura 4.5</b> -Distribuição de tamanho de partícula do Caulim.....	49
<b>Figura 4.6</b> -Distribuição de tamanho de partícula do Quartzo.....	49
<b>Figura 4.7</b> -Distribuição de tamanho de partícula do Albita.....	50
<b>Figura 4.8</b> -Distribuição de tamanho de partícula do RCSM.....	50
<b>Figura 4.9</b> -Morfologia das partículas do caulim: a) 200X; b) 1000X .....	52

<b>Figura 4.10-</b> Morfologia das partículas do pó de quartzo: a) 200X; b)500X; 1000X..	52
<b>Figura 4.11-</b> Morfologia das partículas do pó de albita: a) 500X; b) 1000X.....	53
<b>Figura 4.12-</b> Morfologia das partículas dos grãos de cinza de serragem de madeira: a) 300X; b) 400X; c) 1000X. ....	53
<b>Figura 4.13-</b> Curva termogravimétrica (TG) da cinza da serragem de madeira.....	55
<b>Figura 4.14-</b> Curvas de análise térmica diferencial (DTA) da amostra da albita.....	55
<b>Figura 4.15-</b> Curvas de análises termogravimétrica (TG) e térmica diferencial (ATG e DTA) da amostra do caulim.....	56
<b>Figura 4.16-</b> Curvas de análises termogravimétrica (TG) e térmica diferencial (ATG e DTA) da amostra do quartzo.....	57
<b>Figura 4.17-</b> Distribuição de tamanho de partícula das massas: M1(a); M2(b); M3(c) e M4(d).....	59
<b>Figura 4.18-</b> Retração linear das peças secas a 110°C.....	62
<b>Figura 4.19-</b> Massa específica <i>Bulk</i> das peças secas a 110°C.....	62
<b>Figura 4.20-</b> Absorção de água das peças cerâmicas preparadas em função da adição do resíduo a temperatura de sinterização.....	64
<b>Figura 4.21-</b> Retração linear de queima em função da adição do resíduo a temperatura de sinterização.....	66
<b>Figura 4.22-</b> Massa específica aparente em função da adição do resíduo a temperatura de sinterização.....	67
<b>Figura 4.23-</b> Porosidade aparente em função da adição do resíduo a temperatura de sinterização.....	68
<b>Figura 4.24-</b> Resistência à flexão em função da adição do resíduo a temperatura de sinterização.....	70

**Figura 4.25-** Corpos de prova das massas M1, M2, M3 e M4 sinterizados entre temperaturas de 1190°C a 1250°C.....71



## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1</b> – Classificação dos revestimentos cerâmicos segundo a NBR13818 (ABNT, 1997).....	8
<b>Tabela 2.2</b> – Classificação de acordo com a resistência mecânica à flexão segundo a NBR13817 (ABNT,1997).....	8
<b>Tabela 2.3-</b> Intervalo de variação das matérias-primas típicas utilizadas na fabricação de porcelanato (Biffi,1997).....	10
<b>Tabela 2.4</b> - Conteúdo energético de matérias-primas que podem ser utilizadas pelo processo de queima.....	25
<b>Tabela 2.5</b> – Composição química da cinza de lenha (% peso).....	27
<b>Tabela 2.6-</b> Distribuição de tamanho de partículas da cinza de lenha.....	29
<b>Tabela 2.7-</b> Distribuição granulométrica da CRLA via peneiramento a seco.....	30
<b>Tabela 3.1-</b> Composição das massas cerâmicas (% em peso).....	37
<b>Tabela 4.1</b> – Composição química das matérias-primas utilizadas (% em peso).....	46
<b>Tabela 4.2-</b> Distribuição de tamanho de partículas, índice de plasticidade e densidade real das matérias-primas.....	48
<b>Tabela 4.3-</b> Limite de consistência de Atterberg para o caulim utilizado.....	51
<b>Tabela 4.4-</b> Resultados de análise de solo feitos na Fundenor.....	58
<b>Tabela 4.5-</b> Limite de consistência de Atterberg para as massas de pisos cerâmicos vitrificados.....	60
<b>Tabela 4.6-</b> Massa específica real ( $\text{g/cm}^3$ ) das massas de pisos cerâmicos vitrificados.....	60
<b>Tabela 4.7-</b> Parâmetros físicos das massas cerâmicas microgranuladas.....	61
<b>Tabela 4.8-</b> Propriedades físicas dos corpos cerâmicos após secagem.....	61
<b>Tabela 4.9-</b> Absorção de água das peças cerâmicas.....	63
<b>Tabela 4.10-</b> Retração linear (RLq) das peças cerâmicas.....	65

<b>Tabela 4.11-</b> Massa específica aparente (MEA) das peças cerâmicas.....	66
<b>Tabela 4.12-</b> Porosidade aparente (PA) das peças cerâmicas.....	68
<b>Tabela 4.13-</b> Resistência à flexão das peças cerâmicas.....	69
<b>Tabela 4.14-</b> Tipos de pisos cerâmicos obtidos para as massas cerâmicas preparadas.....	72

**Lista de Fórmulas**

<b>Fórmula 1-</b> Perda ao Fogo .....	35
<b>Fórmula 2-</b> Índice de Plasticidade (IP) de Atterberg.....	38
<b>Fórmula 3 –</b> Retração Linear Secagem.....	39
<b>Fórmula 4 –</b> Massa Específica <i>bulk</i> .....	39
<b>Fórmula 5 –</b> Absorção de Água.....	41
<b>Fórmula 6-</b> Massa Específica Aparente.....	41
<b>Fórmula 7 –</b> Porosidade Aparente.....	41
<b>Fórmula 8-</b> Retração Linear após queima.....	42
<b>Fórmula 9-</b> Tensão de Ruptura à flexão.....	42

Resumo da dissertação de mestrado apresentada ao CCT-UENF como parte dos requisitos para obtenção do grau de mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

## **VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE SERRAGEM DE MADEIRA NA PRODUÇÃO DE PISO CERÂMICO VITRIFICADO**

**Fernanda Peixoto da Silva Gomes**

11 de agosto de 2016

**Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda**

A indústria de cerâmica vermelha da região de Campos dos Goytacazes-RJ gera todo ano enorme volume de resíduo de cinza de serragem de madeira proveniente do processo de queima. O descarte final deste material de resíduo sólido de forma correta é uma questão de alto interesse ambiental e econômico. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a possibilidade de valorização e reaproveitamento do resíduo de cinza de serragem de madeira na formulação de massas cerâmicas para piso cerâmico vitrificado de alta qualidade. Inicialmente as matérias-primas utilizadas foram caracterizadas quanto à difração de raios X, composição química, análise de tamanho de partículas, comportamento térmico, morfologia e plasticidade. Foram preparadas massas cerâmicas contendo até 10% em peso de resíduo de cinza de serragem de madeira (RCSM). Peças cerâmicas foram preparadas por prensagem e queimadas nas temperaturas de 1190°C, 1210°C, 1230°C e 1250°C usando um ciclo de queima rápida. As peças cerâmicas foram caracterizadas em termos de retração linear, absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão. Os resultados experimentais indicaram que para as condições estudadas é possível incorporar até 10% em peso de resíduo de cinza de serragem de madeira (RCSM) na massa de piso cerâmico vitrificado.

Abstract of dissertation presented to CCT-UENF as part of the requirements for obtaining the Master Degree in Materials Engineering and Science.

## **VALORIZATION OF SAWDUST ASHES RESIDUE IN VITRIFIED CERAMIC FLOOR PRODUCTION**

**Fernanda Peixoto da Silva Gomes**

August 11<sup>th</sup>,2016

**Advisor: Prof. José Nilson França de Holanda**

The red ceramic industry at Campos dos Goytacazes-RJ area generates every year an enormous amount of leftover sawdust residue from the burning process. The final disposal of this solid residue material in a proper way is a matter of high interest, both environmental and economic. This study has as main objective evaluating the possibility of valorization and reuse of sawdust ashes residue (RCSM) in the formulation of ceramic mass for high quality vitrified ceramic floor. First, the raw material used were characterized in regards to the x ray diffraction, chemical composition, particle size analysis, heat behavior, morphology and plasticity. Several ceramic mass were prepared containing up to 10% of RCSM. Ceramic pieces were prepared by pressing and burnt in temperatures of 1190°C, 1210°C, 1230°C e 1250°C using a quick burn cycle. These ceramic pieces were characterized in terms of linear shrinkage, water absorption, apparent density, apparent porosity, flexural strength. Under the studied conditions, the experimental results indicate that it is possible to incorporate up to 10% in weight of reuse of sawdust ashes residue (RSCM) in the mass vitrified ceramic floor.

## CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

### 1.1– Aspectos Gerais

Reciclagem é o conjunto das técnicas cuja intenção é empregar detritos e rejeitos e reintroduzi-los no ciclo de produção. A reciclagem de resíduos, independente do seu tipo, oferece várias vantagens em relação à utilização de recursos naturais “virgens”, dentre as quais se tem: diminuição do volume de extração de matérias-primas, redução do consumo de energia, menores emissões de poluentes e melhora da saúde e segurança da população. A conveniência mais visível da reciclagem é a preservação dos recursos naturais, prolongando sua vida útil e reduzindo a destruição da paisagem, fauna e flora. (Menezes, *et al.*, 2002)

O aproveitamento dos resíduos industriais para uso como material alternativo não é novo (Segadães, 2006), e tem dado certo em vários países industrializados. As principais razões que motivam os países a reciclarem seus resíduos industriais são: i) o esgotamento das reservas de matérias-primas naturais confiáveis; ii) o crescente volume de resíduos sólidos, que põe em risco a saúde pública, ocupam o espaço e degradam os recursos naturais; e iii) a legislação ambiental cada vez mais restritiva.

A indústria cerâmica possui um papel fundamental na economia do país, com grande diversidade de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e/ou disponibilidade de tecnologias encontradas nos equipamentos industriais, o que pode explicar a rápida evolução atribuída ao surgimento de diferentes tipos de produtos, dos diversos segmentos cerâmicos, alcançando níveis de qualidade mundiais, de estimáveis quantidades exportadas. (Santos, 2014)

A indústria cerâmica tem se destacado na reciclagem de resíduos sólidos industriais (Perez, *et al.*, 1996; Dantas, *et al.*, 2010; Faria, 2011; Schettino, 2013; Amaral, 2014) Isto se deve a fatores como: i) utiliza elevado volume de matérias-primas naturais; ii) larga variabilidade física, química e mineralógica das matérias-primas; iii) possibilidade de usar uma fonte de matéria-prima de baixo custo ou custo zero; e iv) possibilidade de inertizar resíduos sólidos poluentes.

O município de Campos dos Goytacazes localizado ao norte do estado do Rio de Janeiro possui um parque industrial de “cerâmica vermelha”, com 109 cerâmicas

sindicalizadas e 10 não sindicalizadas, que geram cerca de sete mil empregos diretos. Com uma produção diária de seis milhões de unidades, o que representa uma média mensal de 150 milhões de peças. (Sindicato dos Ceramistas de Campos, 2013). As matérias-primas básicas utilizadas são “argilas”, matérias-primas estas que apresentam singularidades em suas composições, além de serem fontes naturais não renováveis.

O combustível mais utilizado pelas indústrias de cerâmica vermelha é a lenha. Com um consumo médio de 0,4 m<sup>3</sup>/milheiro, densidade de 0,4 ton/m<sup>3</sup> e teor de cinzas da ordem de 3 %, estima-se uma geração mensal de aproximadamente 300 toneladas de cinzas. O tipo de lenha mais comumente utilizado pelas indústrias cerâmicas de Campos dos Goytacazes - RJ é proveniente do eucalipto. Em decorrência do uso da lenha, as indústrias cerâmicas tornam-se também grandes geradoras de resíduo de cinzas. (Borlini, *et al.*, 2005)

Em nível mundial há um crescimento acentuado de trabalhos sobre materiais cerâmicos obtidos com adições de resíduos sólidos de cinzas originados em diversos processos produtivos (Borlini *et al.*, 2005; Borlini *et al.*, 2006, Medeiros, 2010; Faria e Holanda, 2013; Schettino, 2013; Santos, 2014). As motivações deste crescimento foram encontrar formas estáveis para disposição final das cinzas visando evitar seus efeitos poluentes ao meio ambiente. Em alguns casos, não se objetiva obter produtos de maior valor agregado, mas simplesmente estabilizar os poluentes contidos nas cinzas.

## 1.2 – OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho de dissertação de mestrado foi avaliar a possibilidade de valorização e reaproveitamento de resíduo de cinza de serragem de madeira gerado após ciclo de queima na formulação de massas cerâmicas para piso cerâmico vitrificado de alta qualidade.

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterizar do ponto de vista físico, químico e mineralógico as matérias-primas utilizadas;
- b) Caracterizar do ponto de vista físico as massas cerâmicas elaboradas e
- c) Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos corpos cerâmicos elaborados.

## 1.3 - JUSTIFICATIVAS

As cinzas constituem um tipo de resíduo, que pode causar poluição do ar e ser responsável por graves problemas respiratórios na população atingida. Uma alternativa tecnológica para reduzir o impacto ambiental causado pela liberação indiscriminada destes resíduos seria a incorporação em produtos cerâmicos para revestimento para piso vitrificado.

Apesar de ser responsável por cerca de 30 % da produção de produtos cerâmicos do Estado do Rio de Janeiro, o município de Campos dos Goytacazes fabrica produtos de cerâmica vermelha tais como: tijolos cerâmicos, telhas, blocos de vedação, etc. Dessa forma, a formulação de massas cerâmicas para revestimento para piso vitrificado, contendo resíduo de cinza de serragem de madeira, é de grande interesse técnico e científico, possibilitando uma nova fabricação de produtos. Ressalta-se ainda a importância de estudar o efeito da adição deste resíduo nas características da massa cerâmica e propriedades tecnológicas.

Após a introdução e a descrição dos objetivos e justificativas, a presente dissertação de mestrado traz em seu Capítulo 2 a revisão bibliográfica, a qual apresenta a definição, as especificações de norma, as utilizações, as principais matérias-primas empregadas na fabricação de piso cerâmico vitrificado, o processo de fabricação, a secagem, a sinterização dos corpos cerâmicos, o aproveitamento



de diversos tipos de resíduos de cinzas em materiais cerâmicos, e uma descrição sobre o resíduo de cinza de serragem de madeira. Para finalizar este capítulo são apresentados vários trabalhos que tratam da incorporação de resíduos de cinza em massas cerâmicas argilosas.

No Capítulo 3 esta dissertação apresenta os materiais e métodos de análise utilizados para a realização deste trabalho. Encerrados os capítulos 2 e 3, a presente dissertação de mestrado passa a tratar, no Capítulo 4, dos resultados obtidos e da discussão desses resultados. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as sugestões e conclusões.

## CAPÍTULO 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

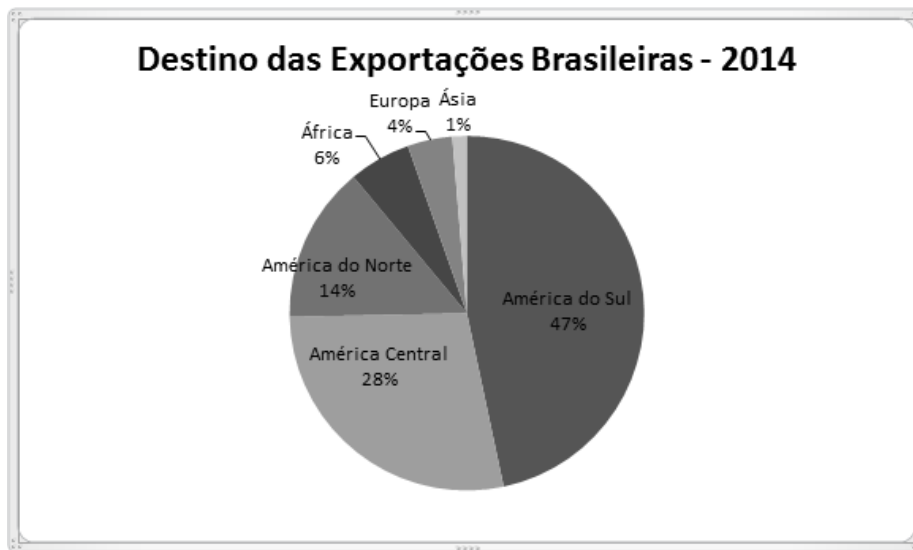
### 2.1- Piso Cerâmico Vitrificado

Nas últimas três décadas a indústria cerâmica teve forte crescimento e desenvolvimento tecnológico no mundo todo. Isto aconteceu devido a fatores como maior conhecimento e qualidade das matérias-primas de partida, bem como melhoria no processamento industrial cerâmico (Freire, 2007).

No início dos anos 70 com o desenvolvimento do forno de rolos monoestrato (sem material portante), utilizado para a produção de cerâmica do tipo monoqueima grês prensada, o consumo de pisos cresceu mais do que dos azulejos (ABC, 2016). Isto devido às novas tecnologias (moagem a úmido, spray dry-ing, prensagem a alta pressão, secagem a rolos, queima rápida, entre outros), automação, e fluxo integrado de produção no processo de manufatura (Manfredini, *et al.*, 1996).

A indústria de revestimentos cerâmicos brasileira tem apresentado um crescimento rápido nos últimos anos, principalmente em relação à produção de pisos cerâmicos de alta qualidade como o grês e o porcelanato. (Souza, *et. al*, 2011).

Segundo a ANFACER (2016), o Brasil é um dos principais protagonistas no mercado mundial de revestimentos cerâmicos, ocupando a segunda posição em produção e consumo. Em 2015, foram produzidos 899,4 milhões de metros quadrados. As vendas totais atingiram 816,3 milhões de metros quadrados no mesmo ano. Em 2014, o Brasil exportou para 113 países, totalizando 69,2 milhões de metros quadrados. As exportações brasileiras têm como principais destinos: América do Sul, América Central, América do Norte e África, como mostra a Figura 2.1:



**Figura 2.1-** Destino das exportações brasileiras 2014 (ANFACER, 2016)

A ANFACER sempre se preocupou com a melhoria da qualidade dos produtos cerâmicos brasileiros. Este fato é comprovado pelo forte comprometimento nas elaborações das normas brasileiras da ABNT tais como NBR 13816, NBR 13817 e NBR 13818 e pela criação, em 1993, do CCB – Centro Cerâmico do Brasil.

O CCB é uma entidade de direito privado, sem fins lucrativos, cujo objetivo é desenvolver e implantar normas técnicas, certificar a qualidade dos produtos cerâmicos e dos sistemas de gestão da qualidade (ISO 9001), bem como atuar como entidade tecnológica do setor cerâmico.

Confiado pelo INMETRO, como Organismo Certificador, o CCB vem atuando ativamente junto aos fabricantes de Cerâmica para Revestimento, Telhas e Blocos Cerâmicos, Telhas de Concreto e Argamassas de Rejuntamento (LabCCB, 2012).

Segundo a ABNT NBR 15463:2007, placas cerâmicas para revestimento são materiais compostos de argila e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes, sendo conformados por extrusão, ou por prensagem, podendo também ser conformados por outros processos. As placas passam por secagem e queima a temperatura de sinterização. Podem ser esmaltadas ou não esmaltadas, em correspondência aos símbolos GL (glazed) ou UGL (unglazed), conforme NBR 13816.

O termo “revestimento” é empregado genericamente tanto para os revestimentos (parede) quanto para os pavimentos (piso) cerâmicos. Atualmente, o

mercado consumidor aceita essa terminologia, adotando “revestimentos cerâmicos” como uma forma geral para materiais de acabamento. (Boschi, 2002)

Segundo Sousa (2008), atualmente, há uma ampla variedade de formas dos revestimentos cerâmicos (retangulares, quadradas ou ortogonais), dimensões variadas (compreendidas entre 10 x 10 e 60 x 120 cm<sup>2</sup>), características técnicas (absorção de água, resistência mecânica e resistência à abrasão do vidrado) e decorativas. Esta ampla diversidade está ligada pelas utilidades destes produtos e seus vários locais de instalação. Os usos dos revestimentos cerâmicos são, dentre outros, os seguintes:

- Revestimento interior de residências (cozinhas e banheiros, etc.)
- Pavimento interior de residências
- Revestimento exterior (fachadas)
- Pavimentos e revestimentos em locais públicos (escolas, hospitais)
- Pavimentos e revestimentos diversos (indústrias, piscinas, etc.)
- Pavimento exterior

Os revestimentos cerâmicos são classificados em vários grupos, dependendo do método de fabricação da capacidade de absorção de água do produto acabado, conforme a Tabela 2.1, e também do módulo de resistência à flexão, conforme a Tabela 2.2. O método mais utilizado é o de fabricação por prensagem.

**Tabela 2.1** – Classificação dos revestimentos cerâmicos de acordo com absorção de água, segundo a NBR13818 (ABNT, 1997)

Grupos		AA (%)	Método de Fabricação			Denominação usual
			Extrusão A	Prensagem B	Outros C	
I	la	$AA \leq 0,5$	AI	Bla	CI	Porcelanato
	lb	$0,5 \leq AA \leq 3,0$		Blb		Grês
II	IIa	$3,0 \leq AA \leq 6,0$	Alla	BIIa	CII	Semi-grês
	IIb	$6,0 \leq AA \leq 10,0$	Allb	BIIb		Semi-poroso
III		$AA > 10$	Allc	BIII	CIII	Poroso

AA = absorção de água

**Tabela 2.2-** Classificação dos revestimentos cerâmicos de acordo com resistência à flexão, segundo a NBR 13817 ( ABNT, 1997).

Grupos		Tensão de Ruptura à Flexão (MPa)	Método de Fabricação			Denominação Usual
			Extrusão A	Prensagem B	Outros C	
I	la	$35 \leq RF \leq 50$	AI	<u>Bla</u>	CI	Porcelanato
	lb	$30 \leq RF \leq 35$		<u>Blb</u>		Grês
II	IIa	$22 \leq RF \leq 30$	<u>Alla</u>	<u>BIIa</u>	CII	<u>Semi-Grês</u>
	IIb	$18 \leq RF \leq 22$	<u>Allb</u>	<u>BIIb</u>		Semi-Poroso
III		$15 \leq RF \leq 18$	<u>Allc</u>	BIII	CIII	Poroso

RF =Ruptura à Flexão

A correta especificação não deve ser baseada em uma única propriedade da placa cerâmica, e sim, em um conjunto de características técnicas que definem a sua utilização nos diferentes ambientes (ANFACER, 2016)

## 2.2- Matérias-Primas para revestimento Cerâmico

Matéria-prima é todo material que sirva de entrada para um sistema de produção qualquer. E o termo matérias-primas se refere a todos os materiais incorporados ao produto no processo de fabricação. (Pinheiro, 2005)

O revestimento cerâmico é um produto constituído de um “biscoito” poroso, coberto em uma face com vidrado que lhe dá o acabamento final. A outra face é a sua superfície de aderência, destinada ao assentamento, chamada de tadoz. (ABC, 2014)

Uma massa cerâmica deve ter características necessárias para permitir uma apropriada trabalhabilidade (plasticidade) durante o processamento e para a aquisição das propriedades finais requeridas. (Vieira, *et al*, 2001).

Segundo Souza (2011), as massas cerâmicas triaxiais usadas na fabricação de pisos cerâmicos vitrificados são basicamente compostas por caulim/material fundente/quartzo. Neste caso, o material fundente na massa cerâmica é de extrema importância devido a sua capacidade de diminuir a temperatura de formação da fase líquida durante o processo de sinterização. Os feldspatos potássico e sódico são os materiais mais usados e dependendo do tipo do piso cerâmico a massa cerâmica pode conter até 50% em peso de feldspato. A fase líquida destina-se preencher a porosidade aberta da estrutura da peça cerâmica, dependendo de sua viscosidade.

A proporção entre os minerais presentes nas massas é a principal responsável pelas fases cerâmicas formadas na queima do revestimento, além das condições de queima (temperatura, taxa de aquecimento e atmosfera do forno) e do tamanho das partículas no produto a verde. Logo, junto às condições de processamento, a composição mineralógica influencia diretamente a propriedade do produto acabado. (Barba, *et.al.*, 2002)

As matérias-primas utilizadas na formulação de massas de porcelanato (Tabela 2.3) assumem, geralmente, configurações mineralógicas distintas, nas quais cada uma exerce função própria e específica: matérias-primas argilosas e não-plásticas. (Santos, 1989)

**Tabela 2.3** – Intervalo de variação das matérias-primas típicas utilizadas na fabricação de porcelanato. (Biffi, 1997)

Matérias-primas	Intervalo de variação (%)
Argilas	30 – 55
Areias de quartzo/feldspáticas	5 – 20
Caulins	0 – 20
Feldspatos	35 – 50
Pigmentos	0 – 5
Silicato de zircônio/alumina	0 – 5
Talco/Magnesita/Dolomita	0 – 4

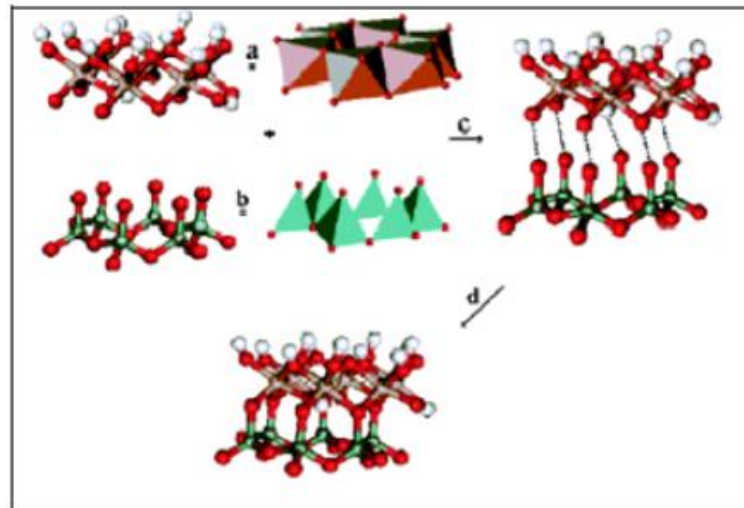
### 2.2.1- Matérias-Primas Plásticas

As matérias-primas consideradas plásticas são aquelas que conferem importantes características na fase de conformação das peças cerâmicas, tais como plasticidade (trabalhabilidade), estrutura e cor, resistência mecânica a cru, e no tratamento térmico (sinterização). (Motta *et al.*, 2002) Uma das principais matérias-primas plásticas utilizadas em revestimento cerâmico vitrificado são os caulins.

#### Caulim

O nome caulim deriva de Kau-ling localidade da China da qual foram extraídas as primeiras amostras. A caulinita, argilomineral predominante no caulim, se apresenta com um empilhamento regular de uma tetraédrica de  $\text{SiO}_4$ . E de uma folha octaédrica de hidróxido de Alumínio ( $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ ) ligados entre si por um íon de oxigênio. Sua fórmula estrutural é a seguinte:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e a sua composição é dada por  $\text{SiO}_2 = 46,54\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 39,5\%$  e  $\text{H}_2\text{O} = 13,96\%$ . O caulim apresenta-se em massa compacta, terrosa, microcristalina de dureza 1 na escala Mohs, massa específica  $2,6 \text{ g/cm}^3$  e brilho baixo de madrepérola. Este é o produto no qual se transformam em profundidade os aluminossilicatos (feldspatos, plagioclásios, feldspatóides) contidos nas rochas. (Biffi, 1997)

A Figura 2.2 (Gardolinski *et al.*, 2003) mostra a estrutura cristalina da caulinita.



**Figura 2.2** – Estrutura da Gibsita (a), Sílica (b). O processo de montagem da estrutura ideal da caulinita (c) e a estrutura final da caulinita (d). (Gardolinski *et al.*, 2003).

Estão presentes no caulim bruto os minerais: quartzo, feldspatos e a mica. Após serem beneficiados, os caulins apresentam percentual de caulinita superior a 80 % (Barba *et. al.*, 2002).

Além de atribuir brancura à massa, a caulinita é a portadora fundamental do óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que durante a fase de vitrificação da massa cerâmica torna-se um regulador do equilíbrio das reações. (Biffi, 1997)

São citadas na literatura as propriedades físicas do caulim e, principalmente as mencionadas abaixo (Silva, 2001):

- i. Granulometria – é mais grosseira que as dos demais tipos de argila (menor que 0,2 mm).
- ii. Cristalinidade – apresenta lamelas hexagonais bem cristalizadas;
- iii. Resistência mecânica – baixa em relação às outras argilas;
- iv. Plasticidade – menos plástico que as demais argilas;
- v. Módulo de ruptura – medido em atmosferas a 80% de umidade relativa.

#### **2.2.1.1- Plasticidade**

A plasticidade pode ser definida como sendo uma propriedade do material, que o torna capaz de deformar-se por ação de uma força, e manter essa deformação quando a aplicação dessa força é interrompida (Santos, 1989). As argilas desenvolvem plasticidade em mistura com água. Um dos métodos mais usados na determinação da plasticidade de argilas é através dos Limites de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP). Limite de plasticidade (LP) indica a quantidade mínima de



água necessária para se fazer moldar uma massa. Valores razoáveis para extrusão são considerados entre 22-24% (Más, 2002).

O limite de liquidez (LL) representa o máximo de água que deve ser adicionada ao material sem que ele perca a consistência plástica. O índice de plasticidade (IP) representa a diferença entre o limite de liquidez e limite de plasticidade, ou seja, representa a quantidade de água que ainda pode ser adicionada a partir do limite de plasticidade, sem alterar o estado plástico da argila ou massa cerâmica. O índice de plasticidade considerado mínimo é de 10% (Abajo, 2000). Estes valores são convertidos no índice de plasticidade (IP), que revela a faixa de teor de umidade em percentual, na qual a massa apresenta-se plástica. Os limites de liquidez e plasticidade e o índice de plasticidade são conhecidos como Limites de Atterberg (Más, 2002).

A plasticidade é uma propriedade característica das argilas. Através do índice de plasticidade, as argilas podem ser enquadradas como sendo de plasticidade elevada (IP > 15%), média (IP entre 7 e 15%) e baixa (IP < 7%) (Santos, 1989).

#### **2.2.1.2- Granulometria**

A granulometria das argilas compreende um extenso universo de tamanho de partículas, geralmente com diâmetro inferior a 2 $\mu$ m, denominada “fração argila”. A definição para a maior dimensão das partículas da “fração argila” é diferente para os diversos ramos da ciência. No entanto, análises granulométricas indicaram que a melhor maneira de distinguir os minerais argilosos ou argilominerais é classificá-los numa fração abaixo de 2 $\mu$ m (Santos, 1989).

O conhecimento da granulometria das partículas de argila permite a previsão do comportamento das matérias-primas durante o processamento, além de tornar possível a classificação dessas matérias-primas de acordo com as perspectivas de aplicação e propriedades desejadas. Desta forma, a afinidade com a água, retração de secagem, trabalhabilidade, resistência mecânica, capacidade de compactação e porosidade de uma argila podem ser prognosticadas pela granulometria (Facincani, 1997)

#### **2.2.2- Matérias- primas não plásticas**

As matérias-primas não plásticas são aquelas que agem nas fases de conformação e secagem, diminuindo a retração das peças e beneficiando a

secagem, e na fase de tratamento térmico (queima), quando desempenham o papel mais importante, controlando as transformações físico-químicas, deformações e a densificação.

Devido ao seu papel na fase de queima, os materiais não plásticos são ainda qualificados de inertes e fundentes (Motta *et al.*, 2002).

A seguir materiais não plásticos utilizados na fabricação de revestimento cerâmico vitrificado:

### **Feldspatos**

Os feldspatos são minerais que têm a função de diminuir a temperatura de formação de fase líquida durante a etapa de queima. Ou seja, são conhecidos como materiais fundentes. Quimicamente podem se distinguir em:

- Ortoclásio: feldspato potássico -  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ;
- Albita: feldspato sódico –  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ;
- Anortitas: feldspato cálcico –  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ .

Estes materiais são responsáveis pela diminuição da porosidade das peças cerâmicas, principalmente, para produtos de grés e grés porcelanato, diminuindo os índices de absorção de água e conseqüentemente aumentando os valores de resistência mecânica (carga de ruptura) dos revestimentos cerâmicos. (Santos 1975; Riella *et. al*, 2002)

O consumo cada vez maior de feldspatos tem contribuído para o aumento do custo desta matéria-prima natural fazendo com que as indústrias de revestimento cerâmico procurem alternativas de outros materiais fundentes, visando à substituição total ou parcial nas composições das massas cerâmicas triaxiais. (Souza, 2011).

### **Quartzo**

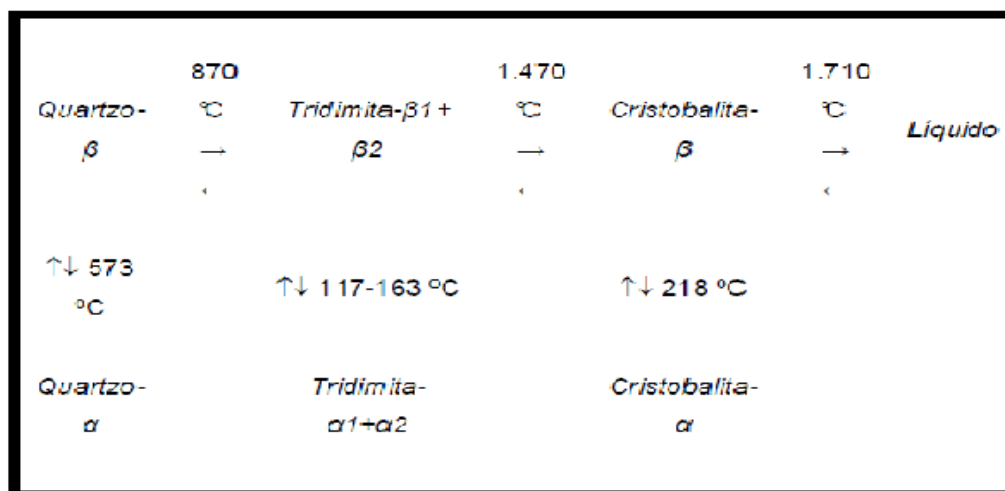
Possuindo uma estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica (dióxido de silício,  $\text{SiO}_2$ ), o quartzo, na temperatura ambiente, é um dos mais puros e abundantes minerais da crosta terrestre. É componente das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. (Saber Web, 2016). Segundo Norton (1973), a estrutura deste mineral é constituída de um retículo tridimensional de tetraedros  $\text{SiO}_4$  ligados numa estrutura compacta, o que está de acordo com sua elevada densidade.

Os vazios abertos na sua estrutura são muito pequenos o que faz com que outros átomos não possam passar, contribuindo assim, para a sua elevada pureza.

Devido às transformações polimórficas apresentadas pela sílica ao longo da faixa de temperatura de processamento dos produtos cerâmicos, este material apresenta restrições quanto ao seu uso industrial, inclusive produtos de cerâmica vermelha e revestimentos cerâmicos. (Schettino, 2013)

A sílica diminui a retração de secagem e queima numa massa cerâmica, diminui também, o tempo de secagem, aumenta o coeficiente de dilatação do corpo cerâmico, diminui, além disso, a resistência do corpo cerâmico a seco e às vezes pode aumentar a refratariedade (Beltrán, *et al.*, 1996). O quartzo aumenta a tenacidade à fratura da matriz cerâmica por mecanismo de deflexão de trincas. Isto ocorre exatamente pelo enfraquecimento da interface quartzo-matriz cerâmica. Se a sílica for utilizada em grandes quantidades (acima de 20% em massa) podem ocorrer trincas no corpo cerâmico, devido a tensões produzidas pela transformação do quartzo- $\alpha$  em quartzo- $\beta$  que ocorre a uma temperatura de 573 °C. A reatividade do quartzo livre com relação aos óxidos presentes na massa é considerada modesta já que a granulometria deste, comumente é grossa e os ciclos de queima atuais são rápidos (Oliveira, 2000).

Na Figura 2.3 (Souza, 2012) são mostradas as transformações polimórficas sofridas pelo quartzo durante a sinterização.



**Figura 2.3** – Transformações polimórficas do quartzo (Souza, 2012).

## **2.3- Processos de Fabricação de Piso Cerâmico Vitrificado**

O processo de fabricação de alguns produtos cerâmicos, revestimentos cerâmicos vitrificados, pode apresentar variação em função do tipo de peça, da produção e do estágio tecnológico da empresa.

De um modo geral, os processos de fabricação compreendem as etapas de preparação de matéria-prima e da massa, conformação, tratamento térmico e acabamento.

### **2.3.1 – Preparação de matéria-prima**

As matérias-primas devem ser beneficiadas, ou seja, passar por tratamentos preliminares. Nestes tratamentos as matérias-primas são desagregadas ou moídas, classificadas de acordo com a granulometria e muitas vezes purificadas. São utilizados vários tipos de moinhos para estes tratamentos preliminares, como moinhos de impacto, moinhos de martelos e outros. Também se utiliza peneiras para classificação granulométrica das partículas e purificação, eliminando impurezas (como mica, matéria orgânica grosseira, quartzo e outras) e para remover ferro ou minerais de ferro encontrados nas matérias-primas, os quais interferem na cor do produto final, existe o processo de separação magnética. (Pinheiro, 2005)

### **2.3.2- Preparação das massas cerâmicas**

Terminadas as operações de beneficiamento ou preparo da matéria-prima, inicia-se a preparação das massas cerâmicas.

Os diversos tipos de massas são preparados de acordo com a técnica a ser empregada para dar forma às peças. Geralmente as massas podem ser classificadas em (Pinheiro, 2005):

- **suspensão**, também chamada barbotina, para aquisição de peças em moldes de gesso ou poliméricos;
- **massas secas ou semi-secas**, na forma granulada, para aquisição de peças por prensagem;
- **massas plásticas**, para aquisição de peças por extrusão, seguida ou não torneamento ou prensagem.

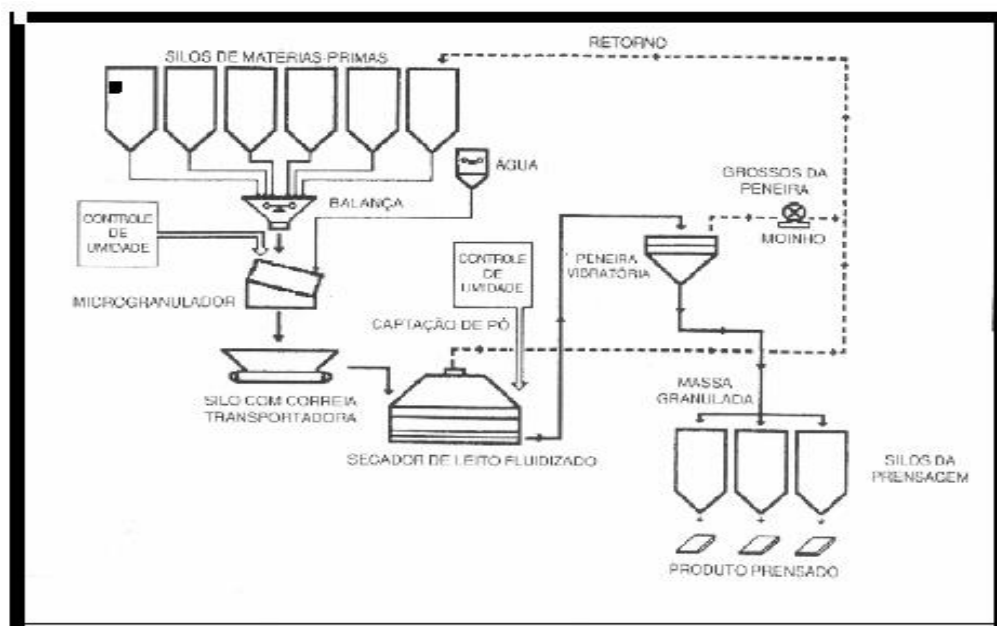
### 2.3.3 - Moagem

A preparação para a fabricação de piso cerâmico pode acontecer através de dois processos de fabricação que se classificam como moagem por via seca e moagem por via úmida.

#### 2.3.3.1 - Moagem por via seca

Na moagem por via seca, as argilas e demais matérias-primas são preparadas para a conformação por prensagem com umidade natural, ou seja, aquela com que foram extraídas da jazida. Neste caso, o beneficiamento destes materiais envolve somente misturas e desagregações para depois serem prensados. (ABC, 2016).

Esta moagem é realizada comumente em moinhos pendulares, obtendo uma mistura com elevada proporção de partículas finas ( $80\% < 60 \mu\text{m}$ ) e uma porcentagem de partículas grossas (superior a  $200 \mu\text{m}$ ) menor que 5%. A Figura 2.4 (Bernardes e Vitti, 1994) mostra esquema de preparação de massa cerâmica por via seca. A mistura é levemente umedecida e granulada para conseguir uma distribuição de tamanhos apropriada para ser prensada nas melhores condições possíveis. Depois de ajustar o conteúdo de água (6-8%), os grânulos são guardados em silos de repouso para serem homogeneizados. Antes da prensagem é conveniente eliminar os aglomerados não grossos.



**Figura 2.4-** Esquema de preparação de massa cerâmica por via seca (Bernardes e Vitti, 1994)

Com relação ao impacto ambiental, o processo de granulação via seca apresenta vantagens em relação ao via úmida, tais como (Lolli, *et al.*, 2000) :

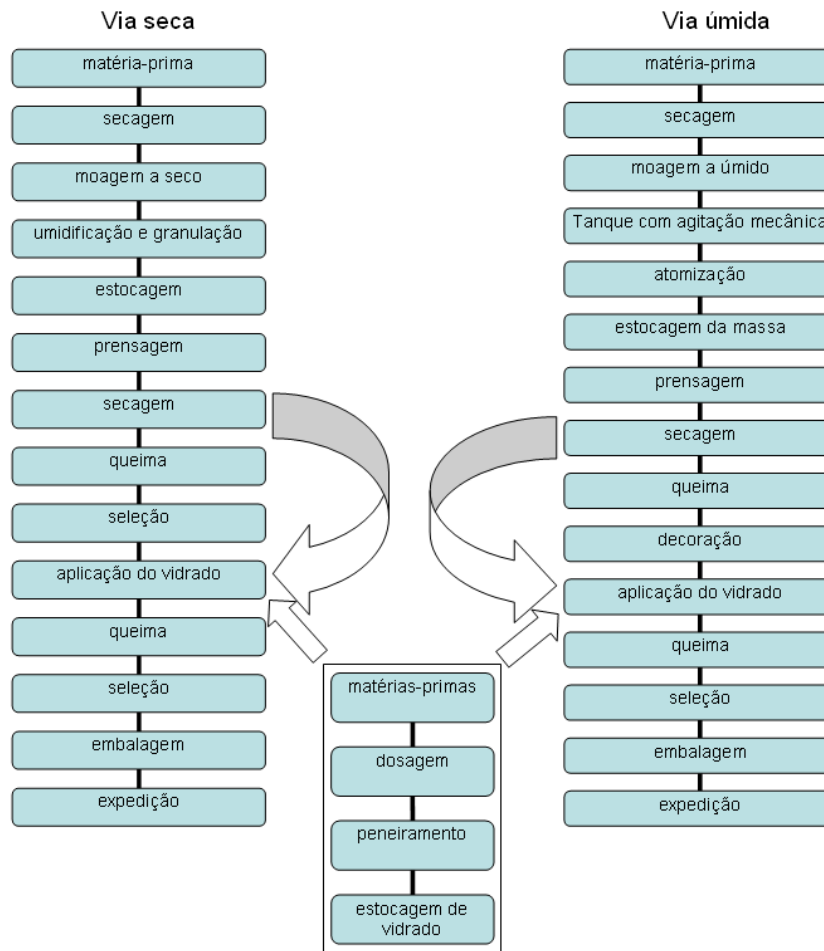
I) Redução das emissões quentes dos processos de secagem dos pós, associada á redução do consumo energético, diminuindo as emissões de gás carbônico na atmosfera e

II) Possibilidade de reciclar em certa medida a cal no granulador como matéria-prima secundária, o que não é possível no processo por via úmida, pois bloqueia a ação dos defloculantes.

### **2.3.3.2 - Moagem por via úmida**

Na moagem por via úmida, as matérias-primas diferentes existentes na composição das massas cerâmicas são homogeneizadas e armazenadas em silos. Então, são fragmentadas até um tamanho de 30  $\mu\text{m}$ . A mistura das argilas é dosificada gravimetricamente e é colocada num moinho de bolas, com água e defloculante em proporções apropriadas. Os defloculantes são usados para aumentar a concentração da suspensão sendo indispensável realizar estudo prévio do comportamento reológico da barbotina, para encontrar a melhor proporção de sólidos e água, do mesmo modo como o tipo e quantidade de defloculante usado. Um dos defloculantes mais usados é o silicato de sódio variando de peso em 0,6 até 0,8%. (Sousa, 2008)

Na Figura 2.5 podemos observar uma comparação entre essas duas formas de preparação das massas cerâmicas.



**Figura 2.5** – Fluxograma do Processo de Fabricação de Revestimento Cerâmico. (ABC, 2016)

#### 2.3.4- Conformação das Peças

O método de conformação considerado no presente trabalho é o método de conformação por prensagem.

Segundo a NBR 15463:2007, as placas cerâmicas de revestimento podem ser conformadas por prensagem, extrusão e colagem por barbotina. A prensagem é o método utilizado com grande predominância para a produção em escala industrial de porcelanatos. A extrusão é empregada apenas em algumas linhas de produtos de acabamentos rústicos, já a colagem de barbotina é utilizada apenas em processos artesanais.

A prensagem é a operação de conformação baseada na compactação de uma massa (pó granulado) colocada no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, através da aplicação de pressão. São utilizadas três etapas: preenchimento da cavidade do molde, compactação da massa, e extração da peça.

A operação de prensagem tem como objetivo, como qualquer operação de conformação, obter peças uniformes, de acordo com as dimensões e a geometria pré-estabelecidas, bem como contribuir na obtenção de uma microestrutura adequada às características finais esperadas.

Para Albero (2000), o ciclo de prensagem normalmente empregado na conformação de revestimento cerâmico é constituído pelas etapas a seguir:

- 1) Preenchimento do molde;
- 2) Ciclo de primeira prensagem;
- 3) Período de densificação;
- 4) Ciclo de segunda prensagem; e
- 5) Extração da peça.

### **2.3.5 - Secagem**

Após a conformação, uma importante etapa produtiva é a secagem.

É nesta etapa que ocorre a remoção do líquido, geralmente água (através de evaporação), que antes atribuía a trabalhabilidade necessária da peça, contribuindo assim, com que o corpo adquira resistência mecânica para queima. É uma etapa decisiva, na qual a retração volumétrica que ocorre ao mesmo tempo à perda de água requer muitos cuidados para evitar trincas e contrações irreversíveis na peça moldada. Ocorrem alguns defeitos que só poderão ser vistos somente depois da queima. (Sousa *et al.*, 2004)

A secagem na produção industrial deve ser bem rápida, mas é necessário um conhecimento prévio, pois se for demasiadamente rápida, a secagem poderá causar diferentes retrações na peça, produzindo assim, trincas. (Sousa, 2008)

O tamanho das partículas e a composição mineralógica dos constituintes adotados na massa são parâmetros para saber o quanto uma peça retrairá na secagem. A retração provocada pela secagem varia de acordo com a plasticidade da massa. Quando úmida essa massa pode ser entendida como uma coleção de partículas onde todas são envolvidas por uma película de água. (Schettino, 2013).

### **2.3.6- Sinterização**

A queima é a etapa final na rota tecnológica da fabricação dos revestimentos cerâmicos e tem como objetivo consolidar o formato das peças que fora obtido na etapa de conformação (Kingery *et al.*, 1975).



Nos últimos anos, esta etapa do processo de fabricação no setor de revestimentos cerâmicos, tem passado por várias modificações com destaque para a diminuição cada vez mais significativa dos ciclos de queima induzindo a um incremento na produtividade (Pinto *et al.*, 2005)

Para Maia (2011), a queima é considerada a etapa “mais cara” da fabricação de cerâmica devido ao alto custo para o fornecimento da fonte térmica, visto que a queima é um processo fundamentalmente energético. A queima industrial de cerâmicas implica no emprego de grande quantidade de energia, consumindo altos volumes de combustível. Este combustível pode ser óleo, gás ou lenha, sendo a lenha a combustível mais acessível às cerâmicas brasileiras.

As peças são submetidas a temperaturas elevadas em fornos contínuos ou intermitentes que operam em três fases: aquecimento da temperatura a temperatura desejada, patamar durante tempo determinado na temperatura desejada e resfriamento até temperaturas inferiores a 200°C.

Durante esta etapa acontece a transmissão de calor às peças, criando assim condições para que aconteçam transformações físicas e químicas que levam às propriedades finais desejadas, tais como: perda de massa, formação de fase vítrea, desenvolvimentos de fases cristalinas e outras.

Durante o processo de sinterização de grês porcelanato diferentes mecanismos são ativos, sendo que os mais importantes são (Souza, 2008):

- I) Difusão superficial, responsável pela forte redução de área superficial com retração desprezível no estágio inicial;
- II) Fluxo viscoso, responsável pela ocorrência de densificação, principalmente no intervalo de 1050 °C – 1200 °C;
- III) Crescimento de poro (inchamento), contrastando a diminuição da taxa de sinterização no estágio final (> 1175 °C) e, resultando em inflação/inchamento por prolongada sinterização e
- IV) Reações que levam ao aparecimento de novas fases.

#### **2.4.- Sinterização e Microestrutura do Porcelanato**

As propriedades dos materiais cerâmicos são necessariamente dependentes da microestrutura. A evolução microestrutural de porcelanas triaxiais durante o processo de queima tem sido intensamente estudada nas últimas seis décadas.

Constata-se, no entanto, que este tipo de material cerâmico continua a proporcionar muitos desafios de pesquisa, devido à interação complexa entre as matérias-primas e a cinética de queima. Além disso, a introdução de resíduos em formulações para grês porcelanato leva a formação de novas fases cerâmicas de alta temperatura (Schettino, 2013).

Ciclo térmico é influenciado pela microestrutura do porcelanato. Existem durante a queima, gases dispersos no interior da peça, bem como gases que são formados em decorrência das reações que vão acontecendo entre os componentes de massa (oxidação de material orgânico e decomposição de minerais que precisam ser eliminados para o meio externo à medida que ocorre a sinterização). A partir de certo estágio da sinterização, a fase vítrea formada envolve praticamente todos os poros devido à concentração de gases que ainda existe no interior do corpo cerâmico. Esses gases são isolados dando origem à porosidade fechada do produto. Isto ocorre devido à alta tensão superficial da película da fase vítrea que envolve os poros. A partir desta fase, os pontos de ligação entre os poros e o meio externo deixam de existir, os dois mecanismos começam a se confrontar diretamente. Com o aumento do fluxo de fase vítrea, em função da diminuição do volume do poro, ocorre um aumento da pressão do gás no interior do mesmo. Seguindo-se o ciclo térmico, aumentando a temperatura, haverá também, o aumento na pressão dos gases, que ocorrerá ao mesmo tempo em que a pressão interna dos gases aprisionados no interior dos poros supera o valor da tensão superficial da fase vítrea, fazendo com que o volume dos poros passe a aumentar, gerando o fenômeno conhecido como inchamento de poros (Arantes *et al.*, 2001).

Nota-se que acontecem uma série de transformações físico-químicas complexas que dependem fortemente da temperatura de sinterização. De tal modo, as massas cerâmicas empregadas na fabricação de porcelanato apresentam durante o processo de sinterização os seguintes fatores:

- I) Decomposição de argilominerais;
- II) Fusão parcial da composição eutética feldspatos-quartzo;
- III) Formação e solução/precipitação de mulita;
- IV) Progressiva dissolução do quartzo na fase líquida em ausência de feldspatos.

Para a fabricação das porcelanas são usadas as seguintes matérias-primas: caulim, feldspato sódico (albita) e quartzo. O caulim serve como fonte de caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que durante a sinterização irá se decompor e formar cristais de mulita e vidro (Pil Tai *et al.*, 2002).

O feldspato, em composições de porcelanas triaxiais atua como fundente, promovendo a formação da fase líquida. O feldspato potássico (albita) apresenta uma fase líquida de menor viscosidade comparado com o outro feldspato, o potássico ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) conhecido como microlina, e também usado em porcelanatos (Riella *et al.*, 2002).

O quartzo participa na formação da microestrutura de várias maneiras. Por ser relativamente grosseiro na composição da porcelana, reduz a retração durante a secagem, evitando o trincamento das peças. Em temperaturas mais elevadas, o quartzo se dissolve na fase vítrea aumentando a quantidade de silício e mantendo sua viscosidade elevada. Durante quase todo o processo de queima, a reatividade do quartzo permanece baixa, garantindo a integridade estrutural da peça e ajudando assim, a prevenir a deformação do corpo (Pinheiro, 2005).

## **2.5- Resíduos industriais e reciclagem**

As questões ambientais não são apenas modismo, o desequilíbrio da natureza, o aumento da poluição, a limitação dos recursos naturais, são sinais de alerta, que já estão sendo ouvidos pela população, governantes e empresários.

Os resíduos industriais podem apresentar em sua composição vários elementos perigosos, além de serem gerados em grande quantidade, sendo foco de constante atenção por parte dos órgãos de fiscalização ambiental e de saúde pública, em função dos comprovados riscos que oferecem (Reis, 2007).

Para suprir as necessidades do mundo moderno, é imprescindível um aumento da produção que paulatinamente contribui para o aumento de resíduos, que nem sempre têm um destino ambientalmente correto. Como não é possível parar a produção, uma das grandes preocupações da atualidade, consiste em reaproveitar os resíduos gerados nos diversos processos produtivos.

Entende-se por resíduos, tudo aquilo que é sobra que é resto e que não possui valor, sendo, então, considerado como lixo, gerando problemas ao meio ambiente. Os resíduos sólidos, segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente

(1988) através da NBR 10004, podem ser de origem industrial, doméstica, hospitalar, agrícola, de serviços e de varrição, e são classificados em:

- Classe I (perigosos) – apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente, exigindo tratamento e disposições especiais em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Como exemplos destes resíduos existem a borra de tinta e resíduos com thinner.

- Classe II (não inertes) – apresentam periculosidade, porém não são inertes e podem ter propriedades de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. São exemplos deste resíduo: papel, lamas de sistemas de tratamento de águas, resíduos provenientes de caldeiras e lodos.

A reutilização de resíduos proveniente de diferentes processos industriais tem sido atualmente objeto de pesquisa em diversas instituições. Hoje em dia, os resíduos estão sendo largamente utilizados pelas indústrias cerâmicas para produção de novas peças cerâmicas, aproveitando o máximo potencial desse material, e conciliando vários aspectos, como custo de disposição, tratamento, tipo e qualidade do resíduo, tecnologia e, finalmente o impacto econômico e ambiental da reciclagem (Melo, 2006).

De acordo com Dobrovolski (1999), os resíduos de madeira podem ser classificados em três tipos: serragem, cepilho e lenha.

1) Serragem – a serragem é um resíduo encontrado na maioria das indústrias de madeira e é gerado principalmente pelo processo de usinagem com serras.

2) Cepilho – o cepilho é um resíduo encontrado geralmente em indústrias beneficiadoras da madeira como por exemplo, a indústria de móveis, gerado pelo processamento em plainas.

3) Lenha - a lenha engloba os resíduos maiores como aparas, refilos, casca, roletes entre outros e também pode ser encontrada em todas as indústrias de madeira. Segundo Brito (1995), a lenha é o tipo de resíduo de maior representatividade, correspondendo a 71% da totalidade dos resíduos, seguido pela serragem que corresponde a 22% do total e, finalmente, os cepilhos, correspondendo a 7% do total.

No Brasil, ocorrem problemas ambientais relacionados à contaminação dos solos e lençóis freáticos devido ao acúmulo e descarte inadequado de resíduos das indústrias madeireiras.

De modo geral, a serragem gerada é queimada ou disposta em aterros inadequados acarretando o desprendimento de chorumes provocando danos ao ambiente, principalmente em córregos, rios e mananciais.

O grande volume de resíduos gerados pelas indústrias de transformação da madeira é um problema existente em praticamente todas as serrarias brasileiras. Embora as empresas modernas incluam em sua atividade o gerenciamento ambiental e o aproveitamento integrado de seus subprodutos, a maioria das serrarias instaladas ainda está despreparada para o descarte apropriado de seus rejeitos (REMADE, 2005).

É importante saber que há uma maneira correta para fazer o descarte de pó de serragem e de outras madeiras, e também existem outras opções para reaproveitamento. A temática do descarte de madeira abrange diversas variáveis como o modo como a madeira foi tratada, se ela é compensa ou maciça, o tipo de madeira, entre outros tantos fatores.

- Madeira pura ou maciça – se soubermos a procedência da madeira, podemos utilizá-la em uma fogueira ou para fogão/forno a lenha. Se as sobras forem as serragens da madeira, é possível utilizá-las como composto orgânico em jardins, hortas e plantações.

Neste trabalho, a serragem de madeira foi utilizada como combustível em forno de queima de tijolos de uma cerâmica. E sua cinza reutilizada na valorização de piso vitrificado.

**Tabela 2.4** - Conteúdo energético de matérias-primas que podem ser utilizadas pelo processo de queima (Dondi *et. al.*,1998)

<b>Tipo de Resíduo</b>	<b>Poder Calorífico (Kcal Kg<sup>-1</sup>)</b>
Coque de petróleo	7500-7700
Resíduos da indústria têxtil	4500-7000
Resíduos de azeitona	4447
Resíduos da noz do coco	3060
Resíduos da indústria de curtume	2000
Exaustão de óleos minerais	1700
Serragem de madeira	1670-4540
Lama da indústria de papel	416
Cinzas	350-2771
Resíduos da extração e tratamento de carvão	300-1380

A Tabela 2.4 mostra os resíduos que podem ser utilizados como conteúdo energético no processamento cerâmico e na otimização da queima. (Dondi *et al.*,1998).

### **2.5.1- Angelim-Pedra (*Hymenolobium petraeum* Ducke)**

A madeira de angelim-pedra é fácil de ser trabalhada. Acabamento de regular a bom na plaina, torno e broca. É moderadamente fácil de serrar e aplainar.

É utilizada na construção civil em vigas, caibros, portas, venezianas, forros entre outros (IPT, 2016).

### **2.5.2 - Peroba (*Aspidosperma polyneuron*)**

É muito utilizada em carpintaria, na fabricação, entre outros objetos, de vigas, escadas, tacos e de móveis pesados. Essa espécie encontra-se na lista das espécies para conservação no Brasil e na Venezuela.

Árvore brasileira caducifólia, de desenvolvimento lento, de madeira dura, que chega a atingir de 20 a 30 m de altura com o tronco ereto o que lhe confere a categoria de madeira de corte (IPT, 2016).

### **2.5.3- Resíduo da cinza**

O resíduo do processamento da madeira é denominado serragem ou pó-de-serra. A maior parte da utilização da serragem atualmente se dá como combustível, e uma pequena quantidade como material filler ou agregados para concretos. (Elinwa e Mahmood, 2002)

O combustível mais utilizado pelas indústrias de cerâmica vermelha do município de Campos dos Goytacazes- RJ é a lenha proveniente do eucalipto. Com um consumo médio 0,4 m<sup>3</sup>/milheiro, densidade de 0,4 t/m e teor de cinzas de ordem de 3%, estima-se uma geração mensal de aproximadamente 300 t de cinzas. Em decorrência do uso da lenha, as indústrias cerâmicas tornam-se também grandes geradoras de cinzas. (Borlini, 2006)

Cinzas constituem um tipo de resíduo que pode causar poluição do ar e ser responsável por graves problemas de saúde na população atingida. Para reduzir o impacto ambiental causado pela liberação indiscriminada de resíduos, particularmente as cinzas, uma alternativa tecnológica seria a incorporação das mesmas em produtos cerâmicos argilosos. Durante a fase da queima do processo de produção de cerâmica a eliminação de metais potencialmente tóxicos pode ser promovida por volatilização, mudanças químicas e estabilização na fase vítrea, formada pela participação de aluminossilicatos e fundentes.

Há um crescimento acentuado de trabalhos sobre materiais cerâmicos obtidos com adições de resíduos sólidos de cinzas originados em diversos processos produtivos (Borlini *et al.*, 2005; Borlini *et al.*, 2006, Medeiros, 2010; Faria e Holanda, 2013; Schettino, 2013; Santos, 2014;). As motivações deste crescimento são encontrar formas estáveis para disposição final das cinzas visando evitar seus efeitos poluentes ao meio ambiente. Em alguns casos, não se objetiva obter produtos de maior valor agregado, mas simplesmente estabilizar os poluentes contidos nas cinzas.

Neste trabalho, foi utilizado resíduo de cinza de serragem de angelim-pedra e peroba. Assim, serão apresentados como exemplos dois trabalhos (Borlini *et al.*, 2005 e Medeiros, 2010) relacionados a cinza de serragem de madeira.

Em 2005, Borlini *et al.* caracterizaram a cinza proveniente da combustão de lenha predominantemente de eucalipto visando sua incorporação na massa de cerâmica vermelha. No referido trabalho, foram realizados ensaios de caracterização mineralógica, química, física e microestrutural.

Segundo a Tabela 2.4, a composição química é caracterizada basicamente por altas quantidades de CaO e SiO<sub>2</sub> e com quantidades significativas de K<sub>2</sub>O e MgO.

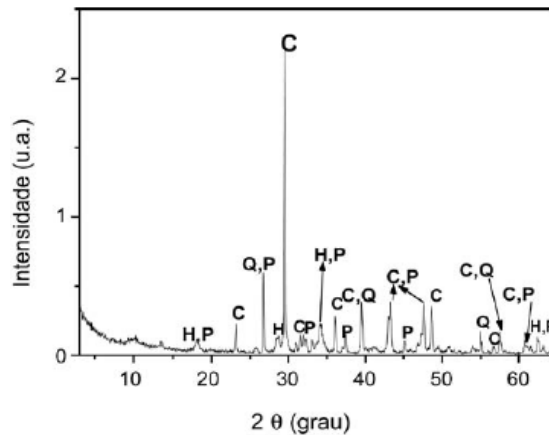
**Tabela 2.5-** Composição química da cinza de lenha (% peso). (Borlini, *et al.*2005)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	MnO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO	PF
16,9	2,7	0,8	7,0	2,4	7,2	32,6	0,39	0,15	4,4	3,7	0,27	21,5

A quantidade elevada de CaO está relacionada a carbonato e hidróxido de cálcio enquanto o SiO<sub>2</sub> está associado com a fase cristalina quartzo. A alta porcentagem de perda ao fogo (21,5% em peso) indica uma elevada fração de matéria orgânica. O teor relativamente elevado de K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O mostra que a cinza pode agir como um fundente potencial e pode contribuir para melhorar as propriedades de queima através da redução da porosidade pela formação de fase líquida em reação com SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. O MgO também pode atuar como fundente durante a etapa de queima. A cinza apresenta ainda traços de Ti, Ni, Rb.

A Figura 2.6 apresenta os resultados da análise por DRX da cinza. Considerando os picos do difratograma verifica-se que a principal fase cristalina existente na cinza é o carbonato de cálcio confirmando os resultados da tabela 2.4. Observa-se ainda a presença de quartzo, hidróxido e fosfato de cálcio.

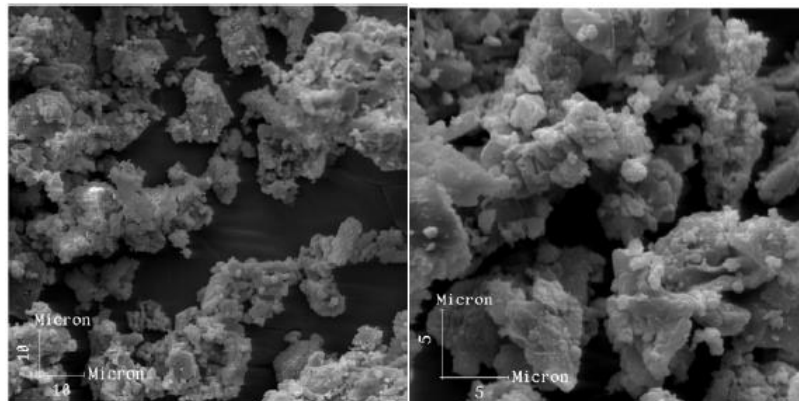




**Figura 2.6-** Difratoograma de raios X da cinza da lenha. C = carbonato de cálcio, H = hidróxido de cálcio, P = fosfato de cálcio, Q = quartzo. (Borlini, *et al.*2005)

Na Figura 2.6, que apresenta os resultados da análise do DRX da cinza, podemos verificar pelos picos do difratograma, que a principal fase cristalina existente na cinza é o carbonato de cálcio confirmando os resultados da Tabela 4. Também existe nesta análise a presença de quartzo, hidróxido e fosfato de cálcio.

Neste mesmo estudo, a análise morfológica da cinza feita através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), mostrou na Figura 2.7 abaixo, que a cinza não se apresenta como partículas separadas, mas sim, como um produto sinterizado e bastante poroso em sua estrutura.



**Figura 2.7 –** Micrografias da cinza da lenha obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). (Adaptado de Borlini, *et al.* 2005)

Medeiros (2010) estudou a incorporação de cinza de lenha em massa cerâmica, pois este resíduo é proveniente da lenha utilizada como combustível das cerâmicas dos estados de Goiás e Distrito Federal.

A análise química deste resíduo apresentou teores de CaO (43,32%), MgO (7,36%) e K<sub>2</sub>O (8,24%), indicando ser fundente e formador de poros para temperatura superior a 1000°C. (Medeiros, 2010)

Na Tabela 2.6, temos a granulometria encontrada deste resíduo no referido trabalho, observando uma quantidade elevada de silte (87,49%).

**Tabela 2.6** – Distribuição de tamanho de partículas da cinza de lenha. (Adaptado de Medeiros, 2010).

Amostra	Argila ( $<2\mu\text{m}$ )	Silte ( $2\leq X < 65\mu\text{m}$ )	Areia ( $65\leq X < 2000\mu\text{m}$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )
Cinza de lenha	8,44	87,49	4,07	25,62

A análise térmica não pode ser realizada a fim de preservar o equipamento (neste caso, o equipamento não utiliza porta amostra descartáveis de cerâmica e sim fixo de metal), pois a cinza de lenha mostrou-se com elevada capacidade corrosiva e fundente no ensaio de perda ao fogo. (Medeiros, 2010).

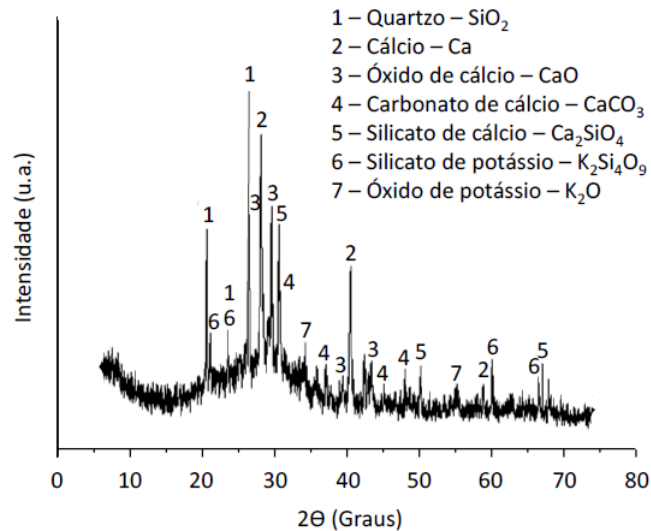
Foi analisado por Medeiros (2010), que os resultados dos difratogramas de raios X deste resíduo, era constituído de quartzo (Q), aluminato de magnésio (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), carbonato de cálcio ou calcita (CaCO<sub>3</sub>) e óxido de cálcio (CaO).

Santos (2014), estudou a cinza residual da lenha de algaroba (CRLA) (*Prosopis juliflora*(Sw) D.C., pertencente à família Mimosaceae que foi introduzida no Brasil na década de 1942, alternativa de alimentação para rebanho durante o período de seca. Sua madeira é combustível natural que pode suprir as exigências de energia das regiões áridas e semiáridas. Com densidade relativa em torno de 0,70 g/cm<sup>3</sup>.

Esta madeira é utilizada não só como fonte de combustível para as olarias paraibanas (e todo agreste nordestino), que são grandes consumidoras de madeira para uso em seus fornos de queima, absorvendo cerca de 4,2 Mm<sup>3</sup> de lenha ao ano, como também, é usada na confecção de móveis, portas, pisos, alimentação para rebanhos e na proteção e enriquecimento de solos pobres. (Santos, 2014)

A análise química feita neste trabalho, revelou grande quantidade de CaO e K<sub>2</sub>O. A presença de CaO em maior quantidade sugere a existência de calcita que, em granulometria reduzida, pode proporcionar um melhor empacotamento ao sistema.

Segundo Santos (2014), o difratograma da CRLA mostrou a presença de quartzo, cálcio, carbonato de cálcio, silicato de cálcio, silicato de potássio e óxido de potássio, que podemos observar na figura 2.9.



**Figura 2.9-** DRX da CRLA (Santos, 2014)

Foi analisada também, por Santos (2014) a distribuição granulométrica da CRLA, conforme a Tabela 2.7:

**Tabela 2.7-** Distribuição granulométrica da CRLA via peneiramento a seco.

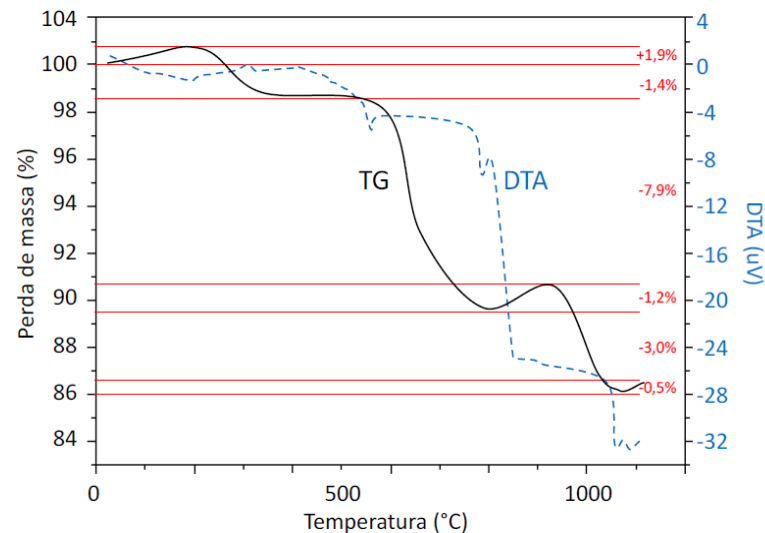
(Adaptado Santos, 2014)

Peneira	Percentual retido
# 20 (> 850 μm)	2,4
# 35 (425 a 850 μm)	11,9
# 60 (250 a 425 μm)	28,1
# 200 (75 a 250 μm)	42,1
Passante # 200 (< 75 μm)	15,5

As partículas de CRLA possuem um diâmetro médio de partícula,  $D_m$ , próximo a 133,6 μm. e a área de superfície específica é de 14,4m<sup>2</sup>/g determinada pelo método BET.(Santos, 2014).

A análise térmica diferencial (DTA) e a análise termogravimétrica (TG) desta cinza (Figura 2.10) mostrou que até 230°C, houve perda de água livre e adsorvida, seguida de redução contínua de massa orgânica (até 380°C). Em torno de 575°C, a presença de SiO<sub>2</sub> pode ser detectada através da transformação de quartzo α em

quartzo  $\beta$ . A presença do pico endotérmico próximo a 800°C deveu-se, provavelmente, à decomposição do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), ao mesmo tempo à presença do CaO encontrado na análise química, somada à liberação de  $\text{CO}_2$ . Em meados da temperatura de 900°C, observou-se a queda brusca na curva de DTA, o que indica, provavelmente, a fusão do material. (Santos, 2014)



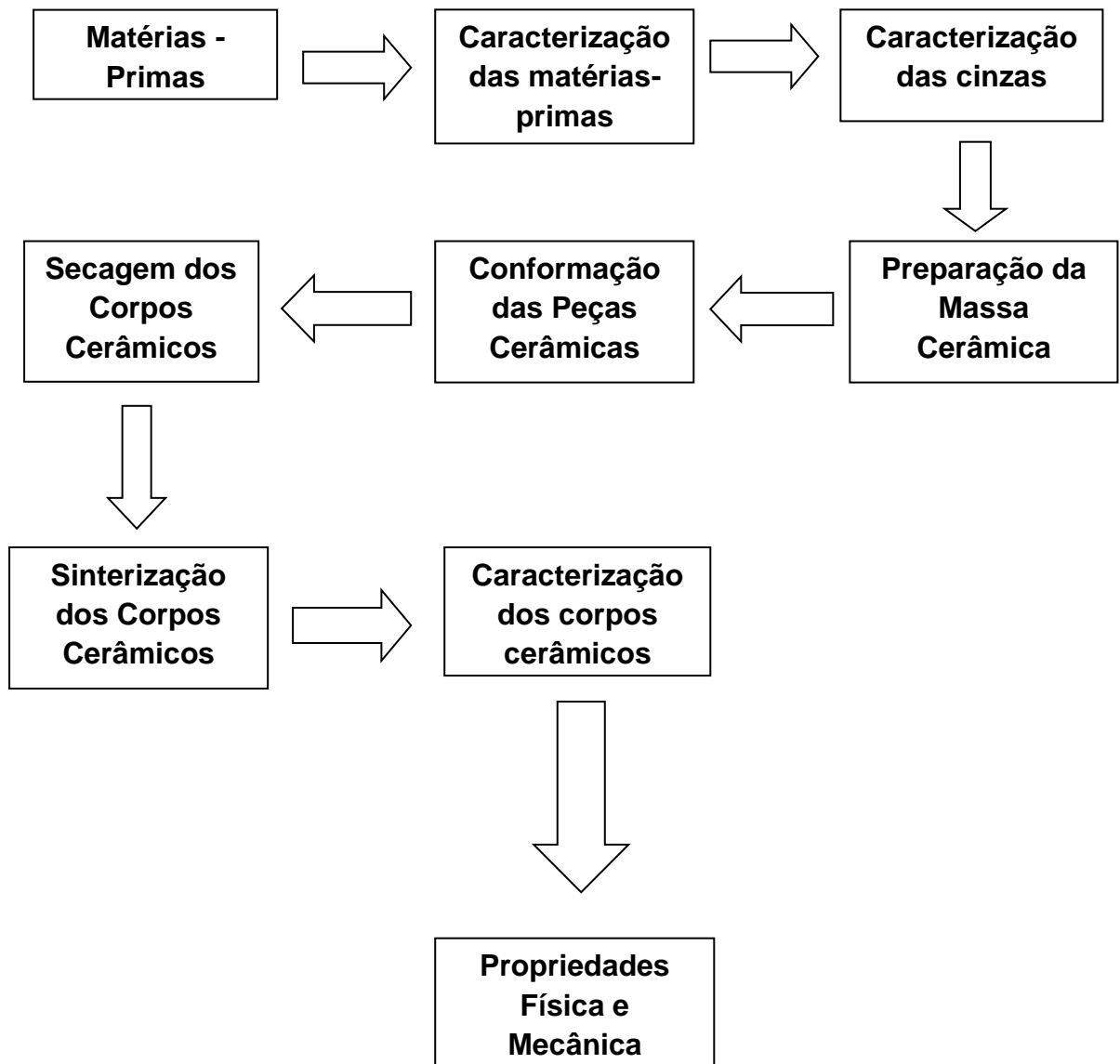
**Figura 2.10-** Curvas de DTA /TG da CRLA (Santos, 2014)

Em seu trabalho, Santos (2014), pode concluir que a CRLA quando adicionada a uma mistura padrão formulada para grês porcelanato, seu teor relativamente elevado de óxidos alcalinos e óxidos alcalino-terrosos, contribuiu para a redução da porosidade de queima, quando exposto à temperatura sugerida para a queima deste tipo de material.

A CRLA foi substituída no trabalho de Santos (2014), pelo feldspato.

## CAPÍTULO 3- MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e a metodologia que foram utilizados neste trabalho. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma envolvendo as etapas do procedimento experimental que foram desenvolvidas.



**Figura 3.1-** Fluxograma da metodologia experimental.

### 3.1- Matérias-primas utilizadas

As matérias-primas utilizadas neste trabalho foram caulim, feldspato sódico (albita), quartzo e resíduo de cinza de serragem de madeira (RCSM). O caulim, feldspato sódico (albita) e o quartzo são matérias-primas comerciais usadas na indústria cerâmica. Essas matérias - primas foram fornecidas pela ARMIL Mineração do Nordeste Ltda., localizada no município de Parelhas- RN.

O resíduo cinza da serragem de madeira (RCSM) foi coletado no forno, após o ciclo de queima, da empresa Arte Cerâmica Sardinha situada na localidade de São Sebastião à Rua Francisco Mota S/N no município de Campos dos Goytacazes-RJ. Foram coletados aproximadamente 10 kg de cinza provenientes da queima da serragem de madeiras como Angelim-Pedra (*Hymenolobium petraeum Ducke*) e Peroba (*Aspidosperma polyneuron*).

Este resíduo foi incorporado à massa cerâmica para substituir o quartzo, com o objetivo de diminuir a retração de secagem e queima, aumentar o coeficiente de dilatação do corpo cerâmico e também refratariedade.

### 3.2 - Beneficiamento das matérias-primas

O caulim, o feldspato sódico (albita) e o quartzo foram fornecidos em forma de pó fino. A cinza de serragem de madeira foi inicialmente esfriada ao ar livre.

Em seguida todas as matérias-primas foram submetidas a um processo de secagem em estufa a 110 °C por um período de 24 h e peneiradas em peneira < 325 mesh (45 µm ABNT).

### 3.3 – Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas caulim, feldspato sódico (albita), o quartzo e a cinza foram submetidas à caracterização física, química e mineralógica utilizando as técnicas de caracterização como: difração de raios X, fluorescência de raios X, análise térmica diferencial, análise termogravimétrica, análise dilatométrica, análise granulométrica, análise morfológica, análise pozolânica da cinza de serragem, como também o teor de matéria orgânica (MO), sais solúveis, capacidade de troca catiônica (CTC) e pH desta cinza.

### 3.3.1 – Caracterização mineralógica

A composição mineralógica das matérias-primas foi determinada por análise de difração de raios-X (DRX) em um difratômetro convencional modelo DRX 7000, marca SHIMADZU (figura 3.2), utilizando-se a radiação monocromática de Cu-K $\alpha$  sob ângulo  $2\theta$  de 10 a 70 °, com passo de 0,05° por minuto. As fases cristalinas foram identificadas por comparação entre as intensidades e as posições dos picos de difração com os valores tabelados pelo JCPDS (Joint Comitee of Power Diffraction Standards).

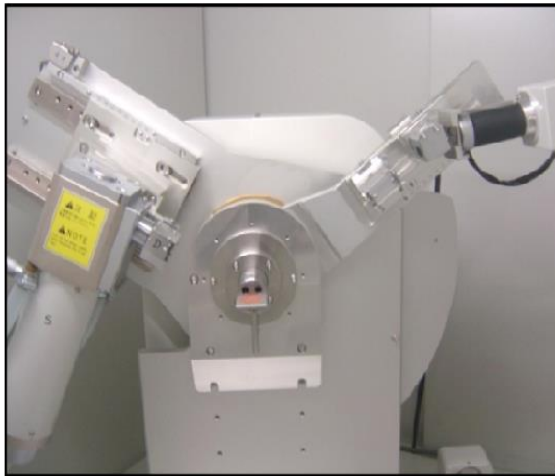


Figura 3.2- Difratômetro de raios X modelo XRD7000, marca SHIMADZU.

### 3.3.2 – Caracterização química

As composições químicas das matérias-primas caulim, feldspato sódico (albita) e quartzo foram determinadas por espectroscopia de absorção atômica, sendo fornecidas pela ARMIL Mineração do Nordeste LTDA. A composição química de cinza de serragem de madeira foi determinada por fluorescência de raios X num equipamento Shimadzu, modelo EDX 700 (Figura 3.3), acoplado a um computador para o processamento de dados. Este experimento foi realizado no setor de caracterização de solos do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF.



**Figura 3.3-** Equipamento modelo EDX – 700 – marca SHIMADZU

Esta análise foi realizada para identificar os elementos presentes na amostra (análise qualitativa) e estabelecer a proporção em que cada elemento se encontra presente (análise quantitativa). Juntamente com a composição química foi determinada também a perda ao fogo (PF) das matérias-primas através da seguinte expressão:

$$PF = \frac{M_s - M_c}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

onde:

PF é a perda ao fogo (%);

$M_s$  é a massa da amostra seca a 110° C (g);

$M_c$  é a massa da amostra calcinada a 1000 °C por 2 horas (g).

### 3.3.3 Análise pozolânica da cinza da serragem de madeira

As pozolanas são, por definição, substâncias constituídas de sílica e alumina que, em presença de água, combinam-se com o hidróxido de cálcio e diferentes componentes do cimento formando compostos estáveis à água e com propriedades aglomerantes. Podem ser classificadas em **naturais** (rochas vulcânicas submetidas à meteorização); **artificiais** (argilas de qualquer tipo submetidas a altas temperaturas para desidratação, porém, a temperaturas abaixo do início da fusão) e, por fim, **subprodutos industriais**: cinzas volantes, cinza de casca de arroz, sílica ativa, entre outros (Leite e Molin, 2002).

O índice de atividade pozolânica da amostra de resíduo de cinza da serragem de madeira foi determinado via condutividade elétrica pelo método de Luxan *et al.* (1989), onde o mesmo foi definido por meio da variação da condutividade elétrica



em 120 segundos de 200 mL de solução saturada de hidróxido de cálcio (CaOH)<sub>2</sub> na temperatura de 40°C , sob agitação, com a adição de 5,0 g do resíduo de cinza de serragem. Têm-se as seguintes classificações desse método:

I. Materiais sem atividade pozolânica: mS/cm < 0,4;

II. Materiais de atividade pozolânica moderada: 0,4 < mS/cm < 1,2;

III. Materiais com alta atividade pozolânica: mS/cm > 1,2.

### **3.3.4- Teor de matéria orgânica (MO), sais solúveis, capacidade de troca catiônica (CTC) e pH da cinza da serragem de madeira**

A análise do teor de matéria orgânica, sais solúveis, CTC e pH da amostra de cinza da serragem de madeira foi realizada na Fundenor/Departamento de Produção Vegetal segundo a metodologia da Embrapa Solos, onde se seguiu o padrão descrito no manual de métodos de análise de solos da mesma.

### **3.3.5- Análise morfológica**

A morfologia e textura dos grânulos das matérias-primas foram observadas num microscópio eletrônico de varredura/EDS, marca Shimadzu, modelo SSX-550, utilizando-se uma voltagem de aceleração de elétrons de 15 kV. As amostras foram colocadas em porta-amostra, aderidas por uma fita dupla face de carbono. Este conjunto foi submetido à secagem em estufa por um período de duas horas a 60 °C, e então recoberto por uma fina camada condutora de ouro.

## **3.4 – Formulação e preparação das massas cerâmicas**

Neste trabalho foi usada uma massa triaxial típica (Tabela 2.3) para revestimento do tipo grês porcelanato, consistindo de uma mistura de caulim, feldspato sódico e quartzo. Essa massa que se constituiu na massa de referência (M1), consiste em 40,0% de caulim, 47,5% de feldspato, 12,5 % de quartzo. As demais massas foram formuladas a partir da substituição gradual de até 10,0% do quartzo, pelo resíduo cinza da serragem de madeira (RCSM), conforme mostrado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1-** Composição das massas cerâmicas (% em peso)

<b>Massas Cerâmicas</b>	<b>Caulim (% em peso)</b>	<b>Albita (% em peso)</b>	<b>Quartzo (% em peso)</b>	<b>RCSM (% em peso)</b>
<b>M1</b>	40,0	47,50	12,50	0,00
<b>M2</b>	40,0	47,50	10,00	2,50
<b>M3</b>	40,0	47,50	7,50	5,00
<b>M4</b>	40,0	47,50	2,50	10,00

As massas cerâmicas foram preparadas pelo processo via seca. Inicialmente as matérias-primas foram secas em estufa até obtenção de umidade inferior a 0,5 %. Em seguida as matérias-primas foram moídas a seco, separadamente, utilizando-se um moinho de bolas, marca Gardelin, modelo 1A MB5, até as matérias-primas atingirem uma granulometria que se passa em peneira 325 mesh (45 µm ABNT). As amostras foram pesadas conforme a formulação descrita na Tabela 3.1 e submetida a um processo de mistura/homogeneização e granulação via seca. O processo de mistura foi feito usando um misturador cilíndrico durante 60 min. Após processo de mistura, as massas cerâmicas foram umidificadas com adição de aproximadamente 7 % de água e granuladas manualmente em uma peneira de abertura de 40 mesh (420 µm ABNT). Por último, as massas cerâmicas foram armazenadas em sacos plásticos e colocadas em dessecador durante 24 horas para garantir uma boa homogeneização da umidade.

### **3.5- Caracterização das massas cerâmicas**

As seguintes características físicas das massas cerâmicas foram determinadas: distribuição de tamanho de grânulos, limites de consistência de Atterberg, massa específica real dos grânulos, massa específica aparente dos grânulos, massa específica vibrada (pp), índice de Hausner (IH) e a morfologia dos grânulos.

As análises granulométricas das amostras foram determinadas de acordo com a NBR 7181-84 (ABNT, 1984), pelo processo combinado de peneiramento e sedimentação. A massa específica real dos grãos foi determinada pelo método de picnometria de líquido, de acordo com os procedimentos previstos pela norma NBR 6508-84 (ABNT, 1984b). As propriedades plásticas foram determinadas segundo as

normas NBR 6459-84 (Limite de Liquidez) e NBR 7180-84 (Limite de plasticidade), através da determinação dos limites de consistência de Atterberg.

O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado pela equação:

$$\text{IP} = \text{LL} - \text{LP} \quad (2)$$

Onde:

IP – Índice de plasticidade,

LL – limite de liquidez e

LP – limite de plasticidade.

A massa específica aparente dos grânulos ( $\rho_g$ ) foi determinada a partir da razão entre a massa de grânulos ( $M_g$ ), em gramas, que ocupa o volume aparente ( $V_a$ ), em  $\text{cm}^3$ , de um recipiente cilíndrico de volume conhecido (copo de densidade). A massa específica vibrada ( $\rho_v$ ) foi obtida mediante a vibração de um recipiente de volume conhecido (copo de densidade) ocupado pelos grânulos após vibração em 40 Hz durante 15 minutos. O índice de Hausner foi definido como a razão entre a massa específica vibrada dos grânulos ( $\rho_v$ ) e a massa específica aparente dos grânulos ( $\rho_g$ ).

### **3.6- Conformação dos corpos cerâmicos.**

A preparação dos corpos cerâmicos foi feita a partir da conformação por prensagem uniaxial em matriz de aço inoxidável retangular, em prensa hidráulica, marca Schwing Siwa, modelo PHMA, capacidade máxima de 30 toneladas. Os corpos-de-prova obtidos consistem de barras retangulares de dimensões de aproximadamente  $11,5 \times 2,54 \text{ cm}^2$ , com espessura inferior a 7,0 mm. A pressão de compactação utilizada foi de 50 MPa.

### **3.7- Secagem dos corpos cerâmicos.**

Neste trabalho a secagem dos corpos cerâmicos foi feita em estufa na temperatura de  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 24h. Em seguida foram determinadas as seguintes propriedades após a etapa de secagem: retração linear de secagem e massa específica bulk.

A retração linear de secagem (RLs) dos corpos cerâmicos foi determinada de acordo com a norma MB-305 (ABNT, 1984) pela seguinte expressão:

$$RLs = \frac{L_0 - L_q}{L_0} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

RLs = retração linear de secagem (%);

$L_0$  = comprimento do corpo cerâmico úmido (mm);

$L_q$  = comprimento do corpo cerâmico seco (mm).

As medidas serão realizadas com auxílio de um paquímetro digital, ( $\pm 0,01$  mm).

A determinação da massa específica *bulk* após secagem ( $\rho_b$ ) dos corpos cerâmicos após secagem foi obtida de acordo com a seguinte expressão:

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_s} \quad (4)$$

Onde:

$\rho_b$ - massa específica *bulk*

$M_s$ - massa (g) dos corpos cerâmicos secos e

$V_s$ - volume (cm<sup>3</sup>) dos corpos cerâmicos secos.

As dimensões dos corpos-de-prova para a determinação do volume também foram realizadas com o auxílio de um paquímetro digital da marca Mitutoyo, com precisão de  $\pm 0,01$  mm.

### 3.8- Sinterização dos corpos cerâmicos

Os corpos cerâmicos foram sinterizados em forno de queima rápida, marca MAITEC, modelo FSQC-1300/3. As temperaturas de sinterização empregadas foram de: 1190 °C, 1210 °C, 1230 °C e 1250 °C.

As etapas do ciclo de queima rápido utilizado, com aproximadamente 60 minutos de duração frio-a-frio, foram:

**a) Etapa de aquecimento**

- Da temperatura ambiente (~ 25°C) até 500°C, com taxa de aquecimento de 70 °C.min<sup>-1</sup>.
- 500 °C até 600 °C, com taxa de aquecimento de 25 °C.min<sup>-1</sup>.
- 600 °C até a temperatura máxima com taxa de aquecimento de 50 °C.min<sup>-1</sup>

**b) Patamar de temperatura máxima de queima**

- Permanência na temperatura máxima de queima de 6 min.

**c) Etapa de resfriamento**

- Da máxima temperatura de queima até 600 °C, com taxa de resfriamento de 120 °C.min<sup>-1</sup>.
- 600 °C até 100 °C, com taxa de resfriamento de 25 °C.min<sup>-1</sup>.
- de 100 °C até temperatura ambiente de aproximadamente 37°C.

**4- Análises das propriedades dos corpos cerâmicos sinterizados**

As seguintes propriedades de interesse tecnológico serão analisadas: absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente, retração linear de queima, tensão de ruptura à flexão.

**4.1 – Absorção de água**

A absorção de água foi determinada de acordo com a norma C 373-72 (ASTM, 1984). O procedimento consistiu na secagem dos corpos cerâmicos em estufa a 110°C por um período suficiente para a obtenção de peso constante, resfriamento em um dessecador, pesagem dos corpos cerâmicos secos e imersão num recipiente contendo água destilada. A água é aquecida e mantida em ebulição por um período de duas horas. Após eliminação do excesso de água superficial com um pano umedecido, os corpos cerâmicos serão pesados, e a absorção de água (AA) é determinada pela seguinte expressão:

$$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

AA - representa absorção de água, em (%);

$M_u$  - representa a massa (g) dos corpos cerâmicos saturados com água;

$M_s$  - representa a massa (g) dos corpos cerâmicos secos

#### 4.2- Massa específica aparente

A massa específica aparente dos corpos cerâmicos foi determinada de acordo com a norma C373-88 (ASTM, 1994) de acordo com a expressão:

$$MEA = \frac{Ms}{Mu - Mi} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

MEA- representa a massa específica aparente, em g/cm<sup>3</sup>;

$M_u$  - representa a massa (g) dos corpos cerâmicos saturados com água;

$M_s$  - representa a massa (g) dos corpos cerâmicos secos;

$M_i$  - representa a massa (g) do corpo cerâmico imerso em água.

#### 4.3- Porosidade aparente

A porosidade aparente (PA) dos corpos cerâmicos foi determinada de acordo com a norma C373-88 (ASTM, 1994), a partir da expressão:

$$PA = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

PA - representa a porosidade aparente, em (%);

$M_u$  - representa a massa (g) dos corpos cerâmicos saturados com água;

$M_s$  representa a massa (g) dos corpos cerâmicos secos;

$M_i$  representa a massa (g) do corpo cerâmico imerso em água, que foi medida pelo método da balança hidrostática.

#### 4.4. Retração linear de queima

A determinação da retração linear (RL<sub>q</sub>) dos corpos cerâmicos após a queima foi determinada sendo a norma MB-305 (ABNT, 1984), e foi utilizado um paquímetro digital com resolução 0,01 mm, para a medição dos comprimentos.

$$RL_q = \frac{L_s - L_q}{L_s} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

RL<sub>q</sub> – representa a retração linear do corpo cerâmico queimado (%);

L<sub>s</sub> – representa o valor do comprimento do corpo cerâmico antes da queima (mm);

L<sub>q</sub> - representa o valor do comprimento do corpo cerâmico após a queima (mm).

#### 4.5- Tensão de ruptura à flexão

A tensão de ruptura à flexão (ensaio de carregamento em três pontos) dos corpos cerâmicos sinterizados foi determinada de acordo com a norma C674-77 (ASTM, 1989), com o objetivo de conhecer a resistência das peças. Para isso foi utilizada uma máquina de ensaios universal, marca INSTRON, modelo 5582 numa taxa de carregamento de 0,5 mm.min<sup>-1</sup>. A tensão de ruptura à flexão foi calculada pela expressão:

$$\sigma = \frac{3 PL}{2 bd^2} \quad (9)$$

Onde:

σ - representa a tensão de ruptura à flexão, em MPa;

P – representa a carga aplicada em N;

L – representa a largura entre os cutelos de apoio, em mm;

b – representa a largura do corpo cerâmico, em mm;

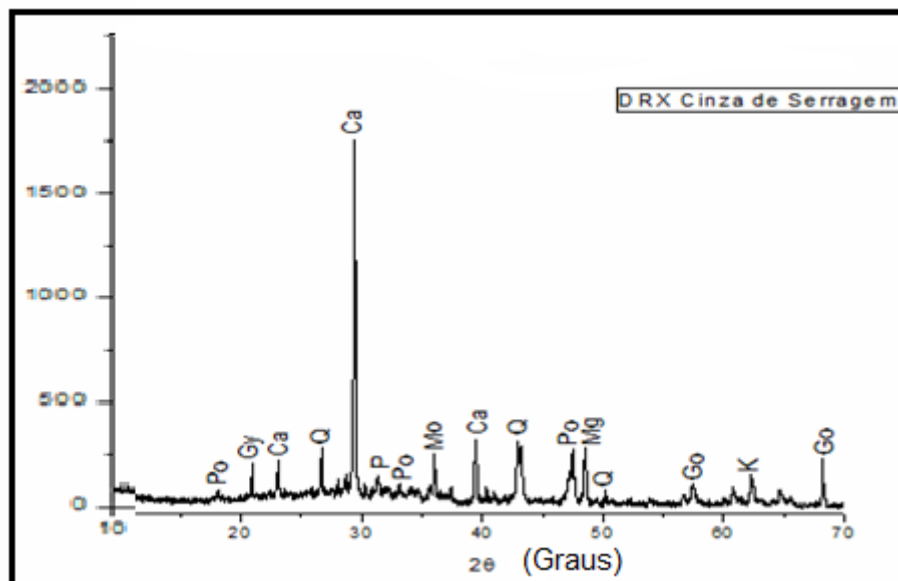
d – representa a espessura do corpo cerâmico, em mm.

## CAPÍTULO 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1- Caracterização das Matérias-Primas utilizadas.

#### 4.1.1- Análise mineralógica das matérias-primas utilizadas.

A Figura 4.1 apresenta o difratograma de raios X do resíduo de cinza de serragem de madeira (RCSM) utilizado neste trabalho. Pode-se verificar analisando os picos do difratograma que o principal mineral presente neste resíduo de cinza de serragem é a calcita (carbonato de cálcio -  $\text{CaCO}_3$ ). Isso confirma a elevada porcentagem de  $\text{CaO}$  que será mostrada nos resultados da composição química (Tabela 4.1). Ainda, pode-se observar a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), montmorilonita ( $(\text{Mg},\text{Ca})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Si}_5\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), goetita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), caulinita ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), fosfato de cálcio ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ), portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e sulfato de magnésio hidratado.

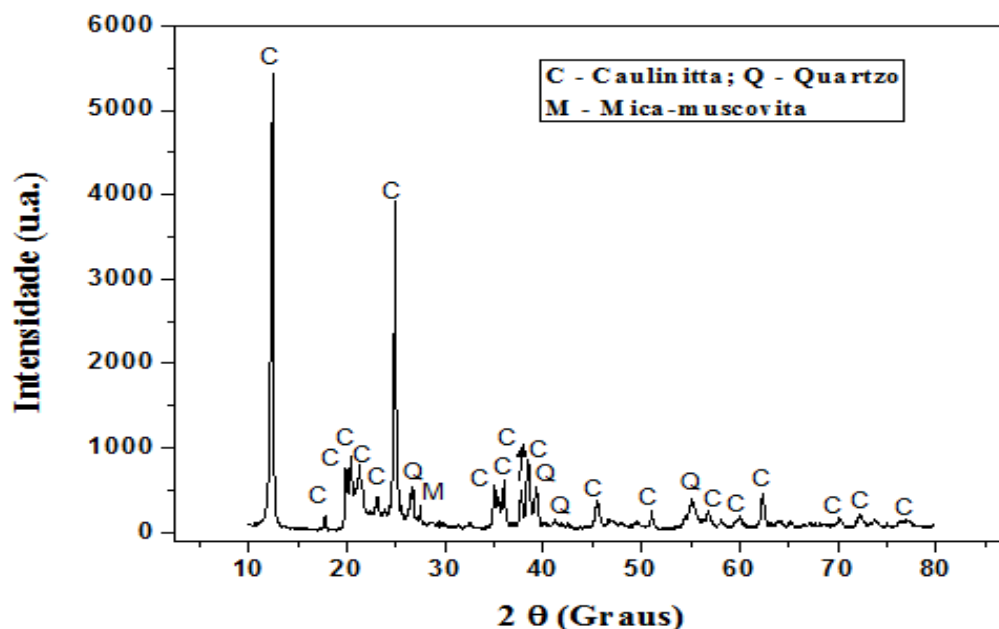


**Figura 4.1-** Difratograma de raios X de cinza de serragem de madeira (RCSM). Onde Q= Quartzo; Ca=Calcita; Gy=Gypsum; Mo=Montmorilonita; Go=Goetita; K=Caolinita; P=Fosfato de Cálcio; Po=Portlandite; Mg=Sulfato de magnésio hidratado.

Na Figura 4.2 é apresentado o difratograma de raios X para o caulim usado neste trabalho. Os resultados mostram que o caulim é constituído principalmente das seguintes fases cristalinas: caulinita ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e de mica



moscovita  $(K, Na)(Al, Mg, Fe)_2(Si_{3,1}, Al_{0,9})O_{10}(OH)_2$  (Chen et al., 2000). A presença de mica pode ser responsável pela presença principalmente de  $MgO$ ,  $K_2O$  e  $Na_2O$ . É fato conhecido que os caulins apresentam juntamente com seu argilomineral constituinte, alguns minerais acessórios como as micas, minerais de ferro e o quartzo (Melchiades *et. al.*, 2002). Pode-se perceber que o argilomineral predominante no caulim é a caulinita, evidenciado pelos seus picos característicos bastante intensos e de forma bem definida. O desvio da razão sílica/alumina do valor teórico da caulinita é explicado pela presença de quartzo, o que confirma que o excesso de  $SiO_2$  está mesmo na forma de quartzo livre. O gypsum (gipsita) é o mineral básico da matéria-prima utilizada na obtenção do gesso. É constituída principalmente de sulfato de cálcio di-hidratado ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), podendo ser oriunda de fontes naturais e fontes residuais (John, Cincotto, 2007). Apresenta como contaminantes a anidrita, a argila, o quartzo, os carbonatos de cálcio e magnésio, os cloretos e outras formas de sulfatos. A portlandite ( $Ca(OH)_2$ ) está relacionada ao calcário, principal matéria-prima do cimento Portland, fabricado a partir de uma mistura de materiais calcários e argilosos, levados a forno e posteriormente moídos (Glasser, 1989).



**Figura 4.2** – Difratograma de raios X do caulim utilizado.

A Figura 4.3 mostra o difratograma de raios X do quartzo utilizado no presente trabalho. Foram identificados picos característicos de quartzo ( $SiO_2$ ) que se

apresentam bastante intensos e de forma bem definida. Pode-se ver que não foram identificados outros minerais, o que evidencia que esta matéria-prima possui um elevado grau de pureza com 98,97 % de SiO<sub>2</sub> conforme a composição química. Segundo a literatura (Norton,1973), o quartzo possui em sua estrutura atômica pequenas vacâncias de modo que outros átomos não podem entrar o que está de acordo com sua elevada pureza.

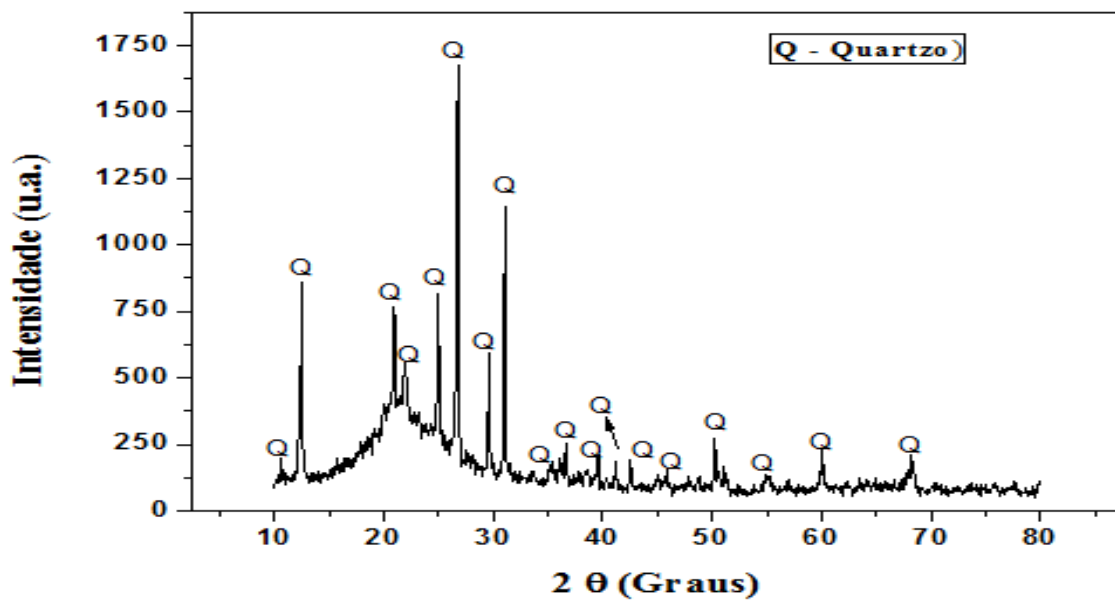


Figura 4.3– Difratoograma de raios X do quartzo utilizado.

A Figura 4.4 apresenta o difratograma de raios X do feldspato sódico (albita).

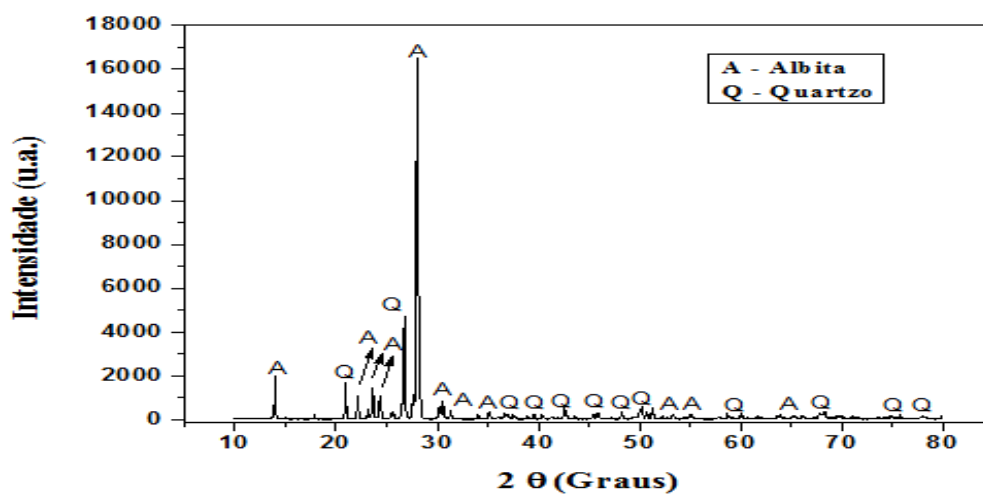


Figura 4.4 - Difratoograma de raios X do feldspato sódico utilizado.

A partir da Figura 4.4 pode-se observar que a amostra de albita utilizada apresenta picos característicos dos seguintes minerais: albita ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ).

#### 4.1.2- Análise química das matérias-primas utilizadas.

Na Tabela 4.1 são encontrados os resultados de composição química para as matérias-primas utilizadas, fornecidos pela ARMIL Mineração do Nordeste Ltda. (caulim, quartzo e albita) e do resíduo de cinza de serragem de madeira (RCSM).

**Tabela 4.1-** Composição química das matérias-primas utilizadas (% em peso)

Amostra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO	*P.F.
Caulim	49,07	33,74	0,22	<0,01	0,30	0,061	1,97	0,52	-	-	14,01
Quartzo	98,97	0,41	<0,01	0,019	<0,01	<0,01	0,18	0,13	-	-	0,26
Albita	69,55	18,82	0,14	0,017	0,17	0,09	1,47	9,63	-	-	0,32
Resíduo	9,55	6,63	4,38	0,83	40,77	10,79	7,35	-	1,68	0,72	17,30

\*P.F. = Perda ao Fogo

O resíduo de cinza de serragem de madeira (RCSM) possui uma grande quantidade de óxido de cálcio (CaO), (Figura 4.1) sólido branco usado na construção civil para fabricar cimento, tijolo e cerâmicas. Geralmente obtido pela decomposição de materiais como o calcário, que contém carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ; mineral calcita) em um forno de cal. Isso acontece pelo aquecimento do material acima de 825°C, num processo chamado de calcinação ou queima de cal, para liberar uma molécula de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), deixando a cal (Glasser, 1989).

O óxido de cálcio (CaO) e magnésio (MgO) são agentes fundentes e tendem a diminuir a refratariedade das peças, indicam a presença de calcita, dolomita e massas calcárias que requerem moagem e temperaturas de sinterização aproximadamente a 1100°C.

A perda ao fogo elevada do resíduo de cinza de serragem de madeira é proveniente da quantidade de matéria orgânica apresentada na análise feita na Fundenor (Tabela 4.4).

Verifica-se que o caulim é constituído principalmente por  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . A presença de  $\text{SiO}_2$  é devido a Silicatos (argilominerais, micas e feldspatos) e à sílica livre. A sílica livre pode ser proveniente de quartzo (variedade cristalina), opala (variedade amorfa), ágata e calcedônia (variedades criptocristalinas), e ácidos silícicos amorfos. A alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) encontrada numa argila está na sua maior parte combinada formando os argilominerais (Santos,1989).

Foi detectada uma pequena quantidade de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o que faz com que o caulim seja apontado como material de queima clara. Em princípio, o ferro pode estar presente numa argila de várias formas; hematita, magnetita, pirita, limonita, goetita ou substituindo o alumínio na rede cristalina dos argilominerais.

Os teores de óxidos alcalinos terrosos ( $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ ) são relativamente baixos. Eles podem estar fazendo parte de compostos como feldspatos ou mica, ou na própria estrutura cristalina dos argilominerais como a illita. Como são agentes fundentes, contribuem para a vitrificação das porcelanas e outros produtos de cerâmica branca (Santos,1989).

São baixos também, os teores de óxidos de alcalinos terrosos ( $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ ), que estão geralmente associados à presença de carbonato de cálcio ( $\text{CaO}_3$ ), carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ) ou carbonato duplo de cálcio e magnésio ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). A elevada perda ao fogo P.F. que o caulim apresenta é, principalmente, devido à água de hidroxilas dos argilominerais, mas também, de hidróxidos existentes como  $\text{Al}(\text{OH}_3)$  e  $\text{Fe}(\text{OH}_3)$ , da decomposição de compostos como sulfatos, sulfetos e carbonatos e, ainda da oxidação de matéria orgânica (Santos, 1989).

O feldspato sódico ou albita utilizado neste trabalho, é constituído principalmente por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ . O óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) é um dos elementos mais importantes para promover a formação de fase líquida. A viscosidade desta fase líquida é uma função da proporção entre os óxidos formadores ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxidos modificadores de rede ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ). A baixa perda ao fogo está relacionada à perda de água adsorvida na superfície da albita (Santos, 1989).

Os resultados da análise química do quartzo utilizado neste trabalho, indicam que ele é relativamente puro, sendo constituído quase que completamente por  $\text{SiO}_2$ .

A baixa perda ao fogo está relacionada à perda de água adsorvida na superfície do quartzo.

#### 4.1.3- Análise física das matérias-primas utilizadas.

##### 4.1.3.1- Análise granulométrica das matérias-primas utilizadas.

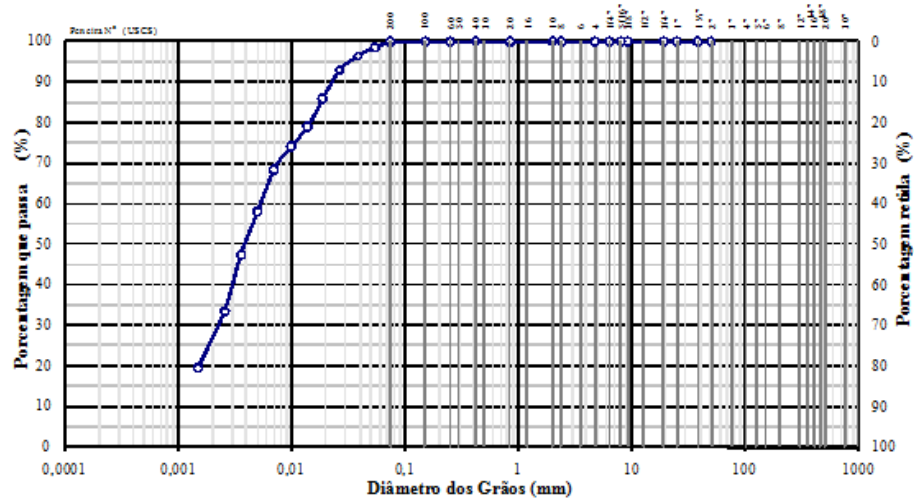
A Tabela 4.2 apresenta os dados de distribuição de tamanho de partículas, índice de plasticidade e massa específica real das matérias-primas utilizadas.

**Tabela 4.2-** Distribuição de tamanho de partículas, índice de plasticidade e densidade real das matérias-primas.

Matéria-Prima	Tamanho de Partícula (%)			IP (%)	$\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )
	< 2 $\mu\text{m}$	$2 \leq x < 63 \mu\text{m}$	$63 \leq x < 200 \mu\text{m}$		
Caulim	26,3	72,7	1,0	13,2	2,52
Albita	8,4	86,6	5,1	NP	2,53
Quartzo	5,6	85,9	8,5	NP	2,61
RCSM	4,8	12,2	73,8	NP	2,49

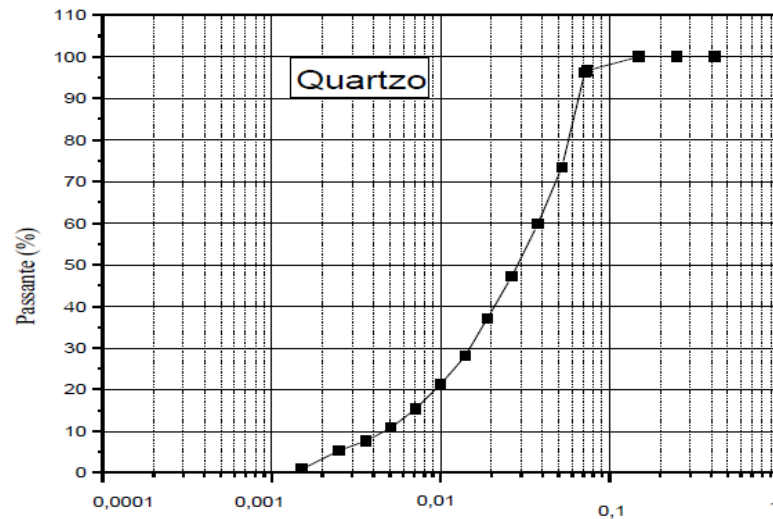
\*NP= Não Plástico

Podemos observar na Tabela 4.2 que o caulim, a albita e o quartzo apresentam uma quantidade elevada de silte ( $2 \leq x < 63 \mu\text{m}$ ) variando de 86,6% para a albita, 85,9% para o quartzo e 72,7% para o caulim. Em relação ao caulim, o pó apresenta uma granulometria um pouco grossa para um argilomineral (Figura 4.5). Segundo Barba *et al.*, (2002), os caulins por pertencerem a diversas origens geológicas, apresentam partículas mais grossas e estruturas cristalinas menos degradadas que as demais argilas. Geralmente os minerais que estão presentes no caulim bruto são quartzo, feldspato e mica. Outra consideração a ser feita, apesar do caulim apresentar 26,3% de fração argila, é que impurezas como quartzo (Figura 4.2) reduzem o teor de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), reduzindo assim, o teor de argilominerais (fração argila) (Carty, 1998).

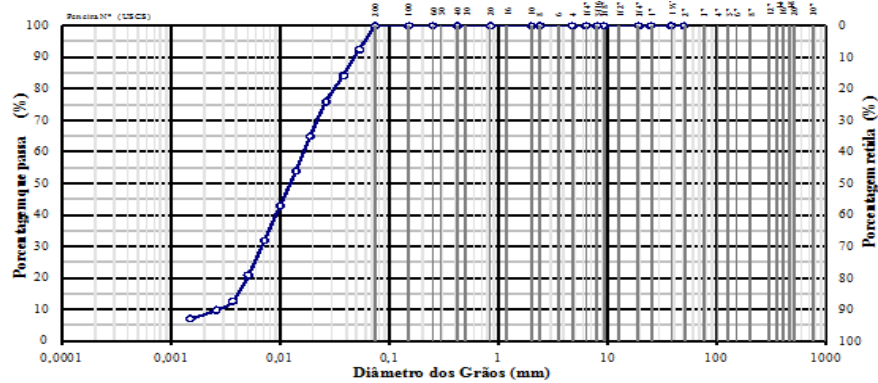


**Figura 4.5-** Distribuição de tamanho de partícula do Caulim.

Quanto à fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ) da albita e do quartzo foi de 8,4% e 5,6% respectivamente. E a fração areia ( $63 \leq x < 200 \mu\text{m}$ ) 8,5% para quartzo e 5,1% para a albita. Podemos observar estas informações nas Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente, que apresentam as curvas de distribuição de tamanho de partículas do quartzo e da albita.

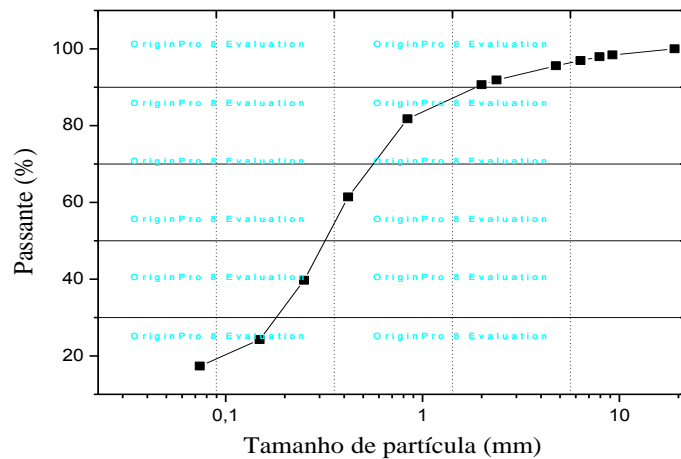


**Figura 4.6-** Distribuição de tamanho de partícula do quartzo.



**Figura 4.7-** Distribuição de tamanho de partícula da albita.

A Figura 4.8 apresenta a curva de distribuição de tamanho de partículas do resíduo de cinza de serragem de madeira, o qual apresenta uma granulometria grosseira 73,8% de areia ( $63 \leq x < 200 \mu\text{m}$ ). O resultado está dentro do esperado, pois a amostra colhida para se fazer à análise da distribuição de tamanho de partícula foi o resíduo de cinza da serragem de madeira enviado da cerâmica em seu estado bruto, sem nenhum tratamento.



**Figura 4.8-** Distribuição de tamanho de partícula do RCSM.

Quanto à densidade real dos grãos, podemos observar na tabela 4.2, que os valores encontrados para as matérias-primas deste trabalho foram de  $2,49 \text{ g/cm}^3$  para o resíduo de cinza de serragem de madeira,  $2,52 \text{ g/cm}^3$  para o caulim,  $2,53 \text{ g/cm}^3$  para a albita e  $2,61 \text{ g/cm}^3$  para o quartzo.

A Tabela 4.3 apresenta os limites de consistência de Atterberg para o caulim utilizado.

**Tabela 4.3** - Limite de consistência de Atterberg para o caulim utilizado.

Matéria-Prima	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
Caulim	43,7%	30,5%	13,2

Foram feitos experimentos no LECIV - UENF para determinar as propriedades plásticas das matérias-primas e os resultados mostraram que a albita, o quartzo e o resíduo de cinza de serragem de madeira são materiais não plásticos, como foi mostrado na Tabela 4.2.

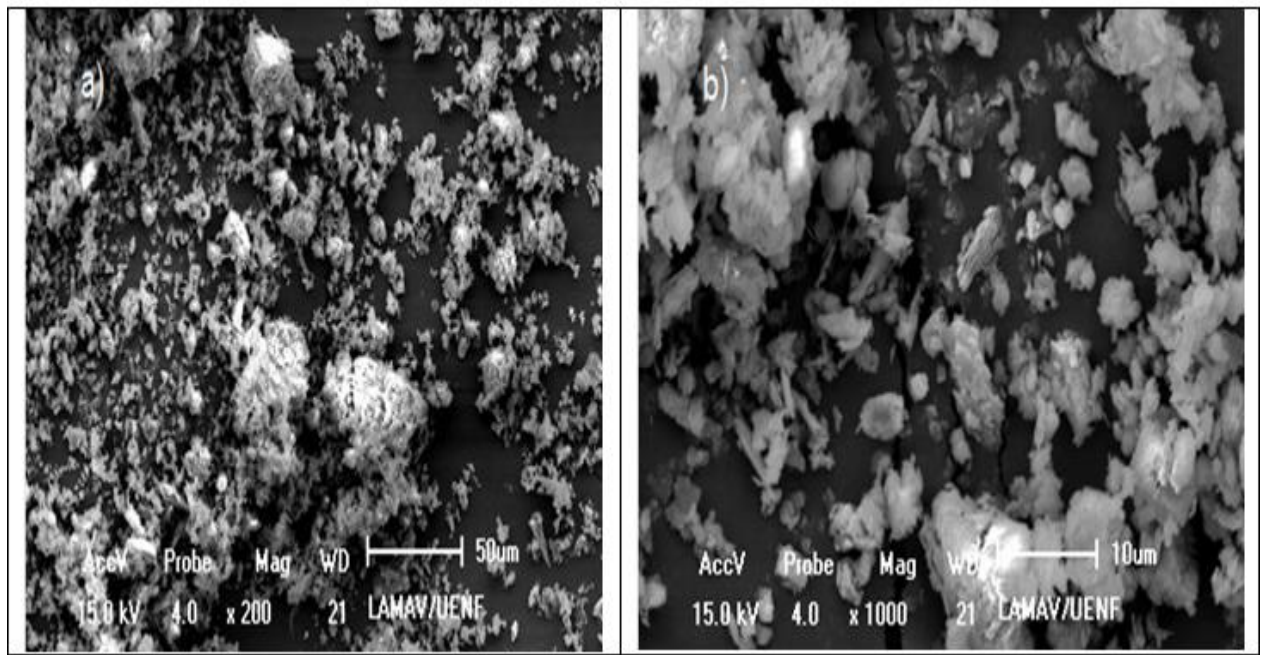
O caulim apresentou um índice de plasticidade relativamente médio de 13,2% (Tabela 4.3), já que através do índice de plasticidade, as argilas podem ser enquadradas como sendo de plasticidade elevada ( $IP > 15\%$ ), média ( $IP$  entre 7 e 15%) e baixa ( $IP < 7\%$ ) (Santos, 1989).

A umidade do solo influencia diretamente o volume de água nele armazenado, bem como a sua resistência e a compactação. Os valores das umidades higroscópicas das matérias-primas foram de 0,7% para o caulim, 0,2% para a albita, 0,1% para o quartzo e 1,7% para o resíduo da cinza, o que está relacionado como suas respectivas granulometrias, com exceção do resíduo que apresentou umidade maior, pois a análise de sua granulometria foi feita em seu estado buto. Segundo a NBR 6457/1986 ABNT, o teor de umidade higroscópica é a umidade que o solo exhibe quando seco ao ar. Ela tende a ser maior a medida que o solo é mais argiloso. Nos solos de granulação grossa (areias e pedregulhos) ela é praticamente desprezível.

#### **4.1.4 – Análise morfológica das matérias-primas utilizadas.**

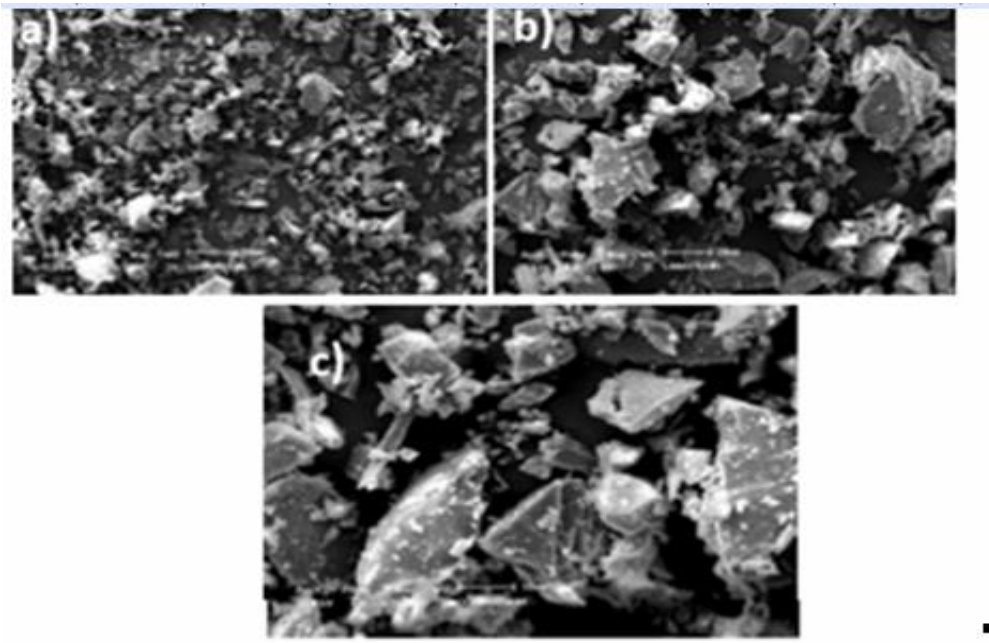
A Figura 4.9 apresenta a morfologia das partículas do caulim, obtida via microscopia eletrônica de varredura. Observa-se morfologia irregular com aspecto angular das partículas de caulim.





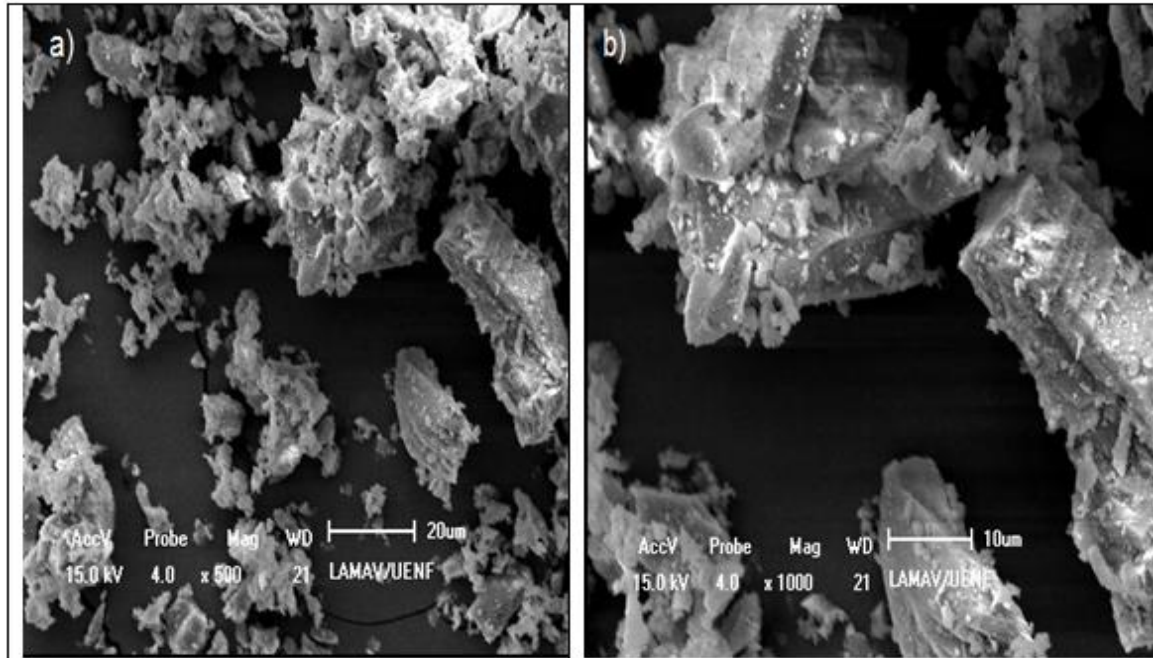
**Figura 4.9-** Morfologia das partículas do caulim: a) 200X; b) 1000X

A Figura 4.10 apresenta a morfologia das partículas do quartzo, obtida via microscopia eletrônica de varredura. Observa-se morfologia irregular com aspecto angular das partículas de quartzo.



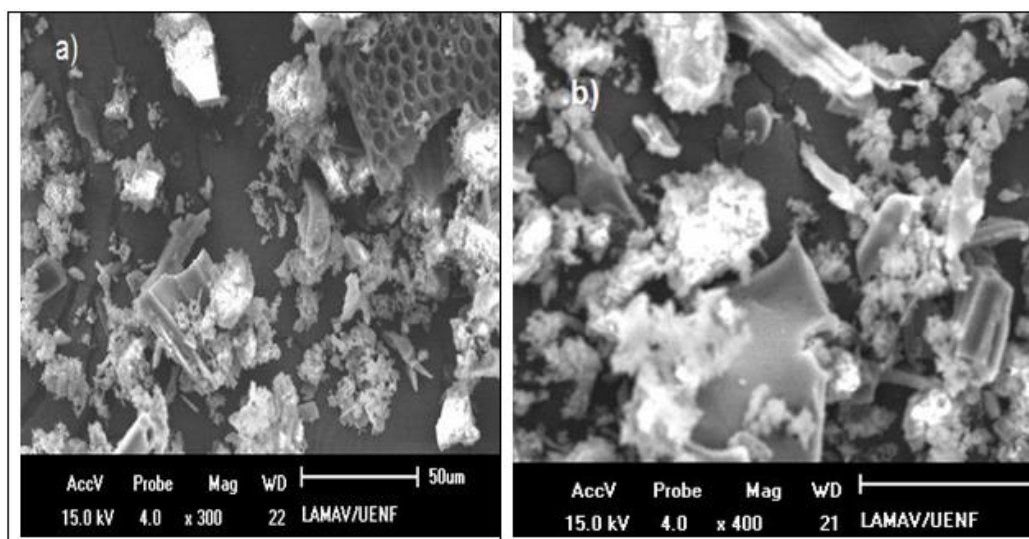
**Figura 4.10–** Morfologia das partículas do pó de quartzo: a) 200X; b) 500X; c) 1000X;

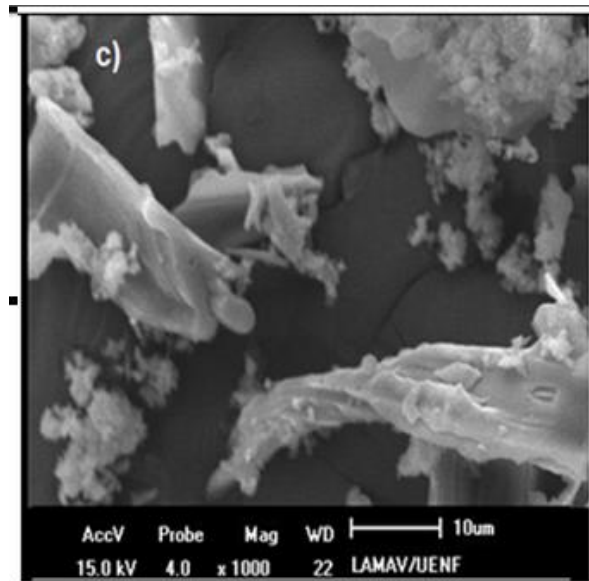
A Figura 4.11 apresenta a morfologia das partículas da albita, obtida via microscopia eletrônica de varredura. Observa-se morfologia irregular com aspecto angular das partículas de albita.



**Figura 4.11-** Morfologia das partículas do pó de albita: a) 500X; b) 1000X.

A Figura 4.12 apresenta a morfologia dos grãos do resíduo de cinza de serragem de madeira (RCSM), obtida via microscopia eletrônica de varredura.



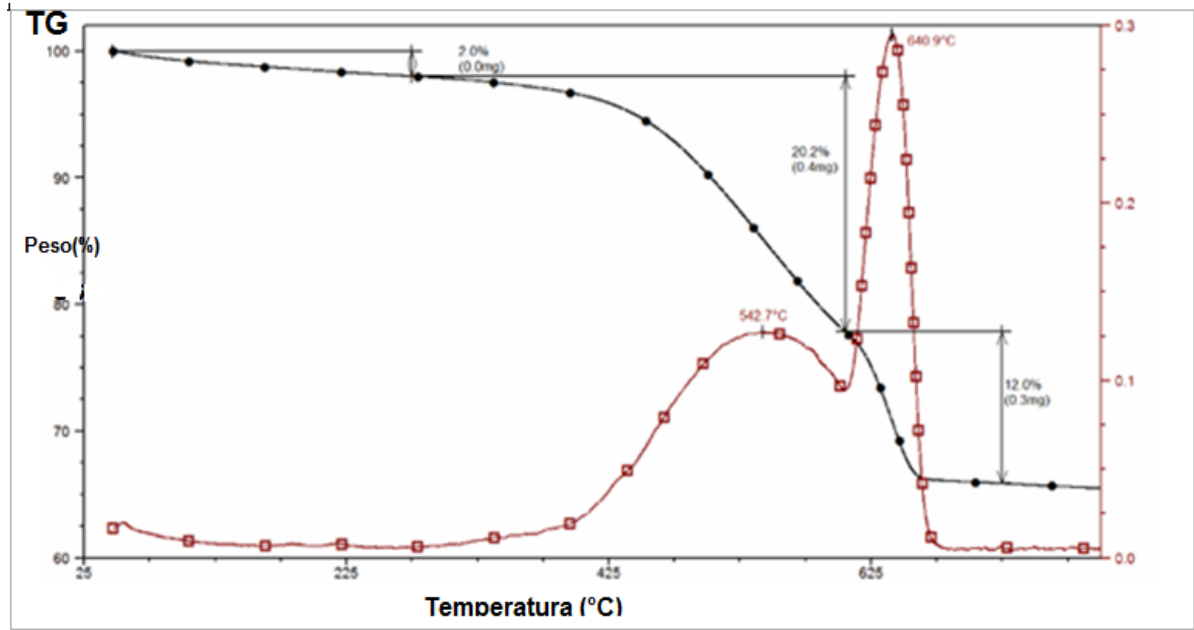


**Figura 4.12**– Morfologia das partículas dos grãos de cinza de serragem de madeira (RCSM): a) 300X; b) 400X; c) 1000X.

Observa-se morfologia irregular e constatou-se que algumas partículas de cinza de serragem apresentam-se aglomeradas (letra a da Figura 4.12). Isso pode ser explicado devido ao fato que as finas partículas da amostra, o que significa alta energia superficial, tendem a se aglomerar.

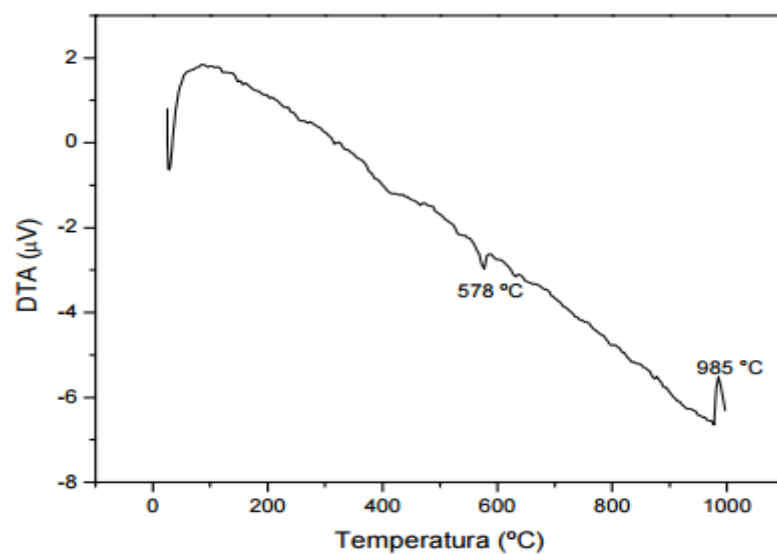
#### **4.1.5- Análise térmica das matérias-primas utilizadas.**

De acordo com a Figura 4.13 podemos observar o resultado da análise termogravimétrica (ATG), na qual indicou que o RCSM apresentou alta perda de massa durante o processo de queima em distintas faixas de temperatura. Observaram-se três perdas de massa na curva ATG, onde a primeira perda de 2,0% de massa a aproximadamente 275°C refere-se à perda de água adsorvida do material; a segunda perda de 20,2% de massa refere-se à desidratação do Sulfato de Magnésio hidratado que ocorre a aproximadamente 500°C e a terceira perda de massa (12%) é referente à decomposição da calcita (carbonato de cálcio).



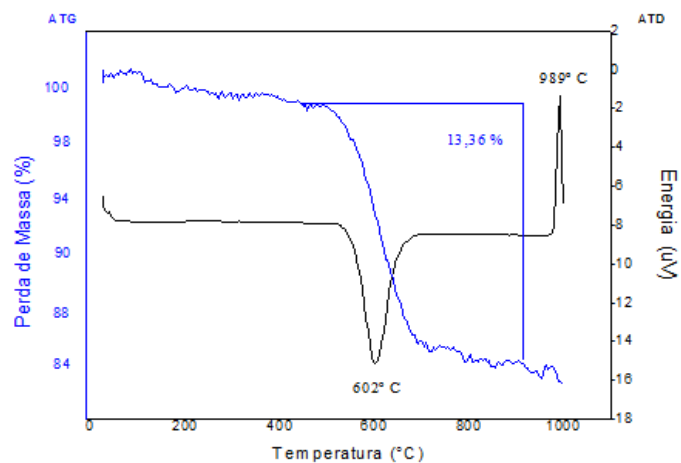
**Figura 4.13-** Curva termogravimétrica (TG) do resíduo de cinza de serragem de madeira (RCSM)

Através da análise da curva DTA da albita (Fig. 4.14) observa-se um pico endotérmico em torno de 578°C, que está associado a transformação do quartzo  $\alpha$  para o quartzo  $\beta$  (Barba *et al.*, 2002). Pode-se verificar também a presença de um pico exotérmico em torno de 985°C, que está relacionado ao ponto ternário do ponto de fusão do feldspato potássico (Araújo, 2008).



**Figura 4.14-** Curvas de análise térmica diferencial (DTA) da amostra da albita.

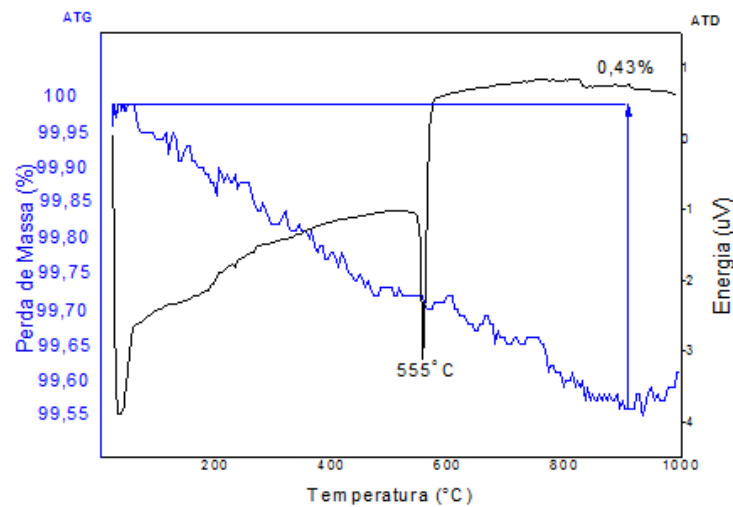
A Figura 4.15 apresenta as curvas das análises térmicas diferencial (ATD) e gravimetria (TG – Termogravimetria) do caulim. Na curva de ATD observa-se um pico endotérmico por volta de 602°C, provavelmente associado à desidroxilação da caulinita e um pico exotérmico em torno de 989°C, provavelmente relacionado à nucleação de mulita primária e a outra fase de aluminosilicatos amorfos, que proporciona a formação da mulita secundária (Barba *et al.*, 2002). Através das curvas de TG e DTG verifica-se perda de massa entre 450 e 600 °C, entre 700 e 760 °C e entre 780 e 860 °C, relacionadas provavelmente à desidroxilação da caulinita e mica e também a recristalização da mica respectivamente, havendo uma perda de massa total de aproximadamente 13,36%. (Menezes *et al.*, 2007)



**Figura 4.15-** Curvas de análises termogravimétrica e térmica diferencial (ATG e DTA) da amostra do caulim.

Para o quartzo (Figura 4.16), houve uma pequena perda de massa 0,43% e verificou-se a 555 °C pico endotérmico que está relacionado com a transição reversível do quartzo  $\alpha$  para  $\beta$ . (Faria, 2015)





**Figura 4.16-** Curvas de análises termogravimétrica e térmica diferencial (ATG e DTA) da amostra do quartzo.

#### 4.1.6- Análise da atividade pozolânica do RCSM.

A diferença de condutividade elétrica da amostra de resíduo de cinza da serragem de madeira pelo método de Luxán foi de 0,5 mS/cm. (Luxan, *et. al.*, 1989). Deste modo a amostra em questão se encaixa no grupo de materiais com atividade pozolânica moderada ( $0,4 < \text{mS/cm} < 1,2$ ). Isto significa que o resíduo de cinza de serragem de madeira tem também potencial para ser usado como material pozolônico.

#### 4.1.7- Teor de matéria orgânica (MO), sais solúveis, capacidade de troca catiônica (CTC) e pH.

Com os resultados da análise de matéria orgânica, sais solúveis, CTC e pH, Tabela 4.4, pode-se afirmar que o resíduo de cinza de serragem de madeira é um material básico, apresentando pH 10,4, ou seja,  $\text{pH} > 7$  (EMBRAPA, 2010). A amostra de resíduo de cinzas estudada apresenta considerável quantidade de sais solúveis (K, Ca, Mg, Na). Isto indica que a sua incorporação em massa argilosa para cerâmica vermelha deve ser feita de forma moderada devido à fluorescência que é um defeito que pode ocorrer no material. Fluorescência são depósitos salinos que se formam nas peças cerâmicas queimadas que podem causar danos estéticos, afetar a durabilidade e diminuir a resistência da peça. (Menezes, R.R., *et al* 2006).

A amostra de resíduo de cinzas apresentou valor de matéria orgânica de 6,83 %. Isto indica que o uso deste resíduo em cerâmica vermelha deve ser feito de forma moderada devido ao coração negro que é um defeito que pode ocorrer no material. O coração negro está associado à presença de compostos de carbono (matéria orgânica) e óxidos de ferro nas argilas (Beltran *et.al.*,1988). O desenvolvimento deste defeito é devido a transformação em coque (C) + CO (g) + CO<sub>2</sub> (g) através das reações de carbonização ou pirólise da matéria orgânica, catalisadas pelo silicato de alumínio que também está presente nos argilominerais. As elevadas capacidades redutoras do C e CO provocam a redução do ferro em Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> e FeO, esse ferro reduzido apresenta coloração mais escura e é mais fundente do que no seu estado oxidado, assim há a maior fusibilidade da massa nessa região (onde o Fe é reduzido) em relação ao restante da peça o que dificulta a saída dos gases liberados nas reações que ocorrem no material causando, deste modo, inchamento da peça, deformação, deterioração das características técnicas e deterioração das características estéticas da peça (Damiani ,*et al.* 2001).

A capacidade de troca catiônica (CTC) está dentro da faixa dos argilominerais que vai de 50 a 500 milimolc/dm<sup>3</sup> (Embrapa, 2010).

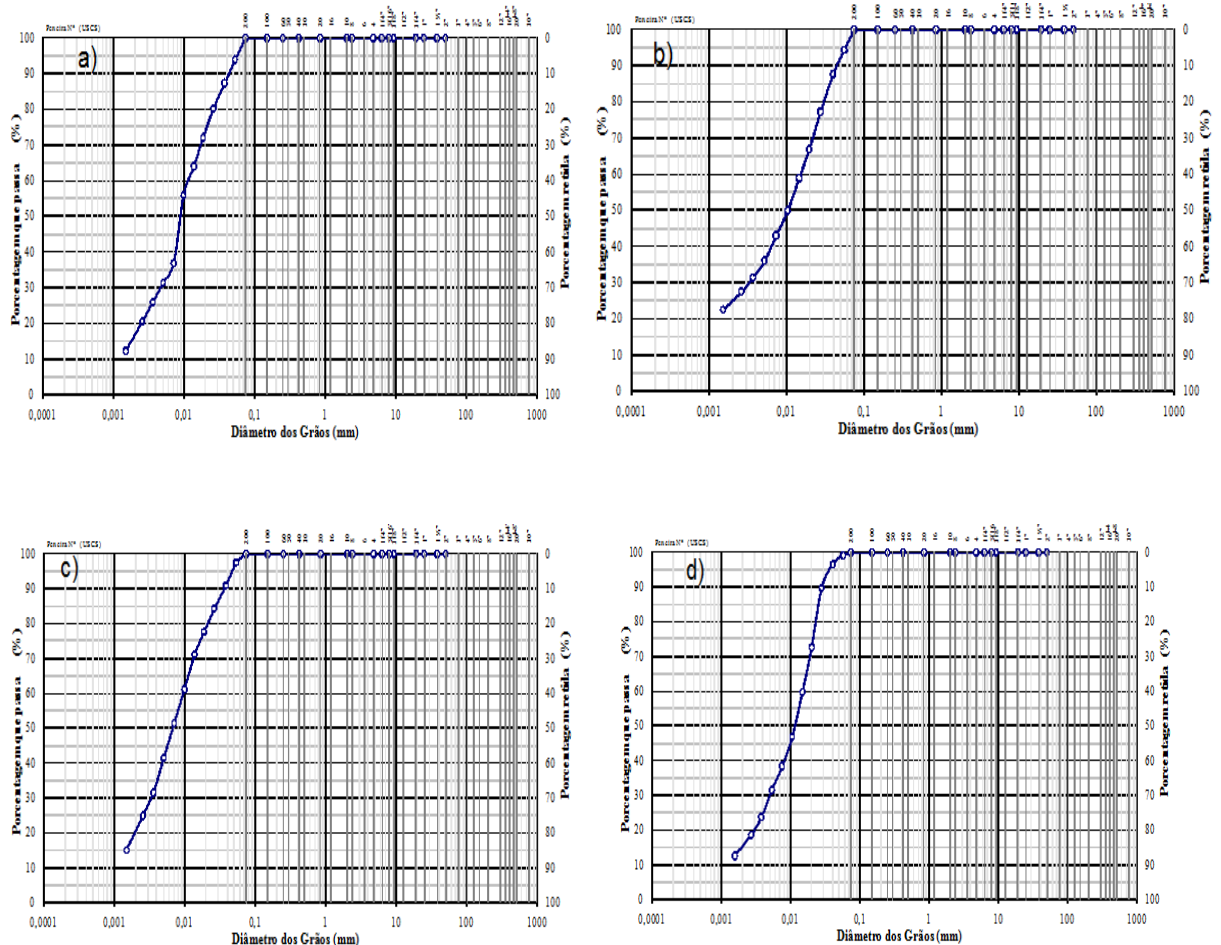
**Tabela 4.4-** Resultados de análise de solo feitas na Fundenor.

Resultados de Análise de Solo							
pH	K	Ca	Na	Mg	C	MO	CTC
(H <sub>2</sub> O)	(mmolc/dm <sup>3</sup> )				(g/dm <sup>3</sup> ) / %		(mmolc/dm <sup>3</sup> )
10,4	69,3	18,3	8,5	44	39,6	6,83	170,1

## 4.2- Caracterização das Massas Cerâmicas Incorporadas com resíduo de cinza de serragem de madeira (RCSM)

### 4.2.1- Análise granulométrica das massas cerâmicas.

Na Figura 4.17, podemos observar as análises granulométricas das massas cerâmicas utilizadas neste trabalho. Sendo a M1 (massa referência) com 0% de resíduo, M2 com adição de 2,5% de resíduo, M3 com adição de 5,0% e M4 com adição de 10,0% de RCSM. Os valores de fração argila obtidos para essas massas foram de 16,4%, 24,8%, 20,0% e 15,1% respectivamente.



**Figura 4.17-** Distribuição de tamanho de partícula das massas: M1 (a); M2 (b); M3 (c) e M4 (d).

Verifica-se que o teor de silte ( $2 \leq x < 63 \mu\text{m}$ ) para as massas nessa mesma ordem foram de 79,6%, 71,0%, 78,3% e 84,2%. Os teores de areia ( $63 \leq x < 200 \mu\text{m}$ ) foram de 4,0%, 4,2%, 1,7% e 0,7%, respectivamente. Esses valores evidenciam que com a adição de resíduo na M1, M3 e M4, aumenta a quantidade de partículas grosseiras, comprovando a análise granulométrica do RCSM (Fig. 4.8) que apresenta teor de areia no valor 73,8%. A M2 apresentou um teor menor de silte e maior quantidade de fração argila.

Na Tabela 4.5 estão apresentados os valores dos limites de consistência de Atterberg para as massas de pisos cerâmicos vitrificados (M1, M2, M3, M4).



**Tabela 4.5-** Limite de consistência de Atterberg para as massas de pisos cerâmicos vitrificados.

<b>Limites de consistência de Atterberg</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>
Limite de liquidez (%)	31,6	33,7	36,8	0
Limite de plasticidade (%)	19,5	20,8	23,9	NP
Índice de plasticidade (%)	12,1	13,0	12,9	NP

\*NP= Não Plástico

Podemos observar que o RCSM, o quartzo e a albita utilizados nas massas são materiais não plásticos, e o índice de plasticidade do caulim (13,2%) é considerado médio (Tabela 4.3), então, as análises das massas M2 e M3 confirmam a plasticidade média da massa referência M1. O índice de plasticidade da M4 não pôde ser avaliada.

**Tabela 4.6-** Massa específica real ( $\text{g/cm}^3$ ) das massas de pisos cerâmicos vitrificados.

<b>Massas</b>	<b>Massa específica real dos grãos (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b>
<b>M1</b>	<b>2,55</b>
<b>M2</b>	<b>2,47</b>
<b>M3</b>	<b>2,56</b>
<b>M4</b>	<b>2,45</b>

A Tabela 4.6 apresenta os valores de massa real dos grãos (MERG) para as partículas das massas de pisos cerâmicos vitrificados. Observa-se que o valor de MERG comparados com a massa referência (M1) diminui para M2 e M4 adicionando-se 2,5% e 10,0% de resíduo e aumenta pouco para M3 com a adição de 5,0% de RCSM.

A Tabela 4.7 apresenta os dados de massa específica aparente ( $\text{g.cm}^3$ ), densidade vibrada ( $\text{g.cm}^3$ ) e índice de Hausner (IH) para as massas cerâmicas granuladas com 7,0 % de umidade. Este parâmetro físico é um indicativo da fluidez das massas cerâmicas. Os resultados mostram que as massas cerâmicas apresentaram um valor de índice de Hausner no intervalo de 1,08 – 1,26. Destacando-se a M2 e M3 com menores índices. O índice de Hausner da massa

granulada mais próximo da unidade (1) comprova a sua maior escoabilidade e indica uma boa fluidez da massa cerâmica obtida pelo processo via seca, representando um ganho em tempo e um aumento da eficiência do processo de compactação (Souza, 2008).

**Tabela 4.7-** Parâmetros físicos das massas cerâmicas microgranuladas.

	M1	M2	M3	M4
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,66	0,67	0,70	0,59
Massa específica vibrada (g/cm <sup>3</sup> )	0,83	0,70	0,76	0,69
Índice de Hausner (IH)	1,26	1,04	1,09	1,17

### 4.3- Efeitos do resíduo cinza da serragem de madeira (RCSM) nas propriedades tecnológicas de secagem.

#### 4.3.1- Avaliação das propriedades tecnológicas de secagem.

Na Tabela 4.8 estão apresentados os valores das propriedades tecnológicas das peças de cerâmicas secas a 110°C. Para melhor visualização dos efeitos do RCSM nas propriedades das peças cerâmicas foram construídos gráficos para retração linear (RLs) e massa específica *Bulk* (Ds) dos corpos cerâmicos após a secagem, conforme mostrado nas Figuras 4.18 e 4.19.

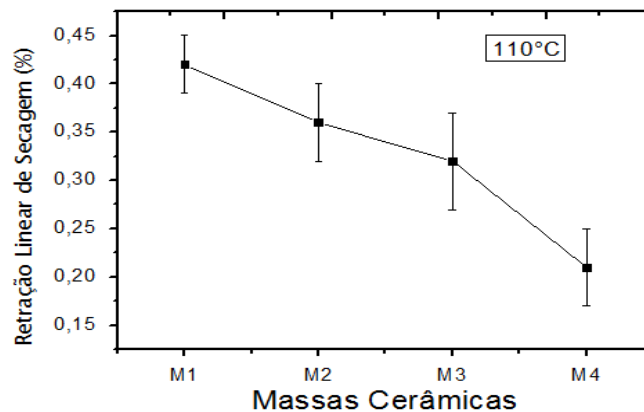
**Tabela 4.8-** Propriedades físicas dos corpos cerâmicos após secagem.

Massas Cerâmicas	RLs (%)	DLs (%)
M1	0,42 ± 0,03	1,80 ± 0,03
M2	0,36 ± 0,04	1,78 ± 0,07
M3	0,32 ± 0,05	1,77 ± 0,02
M4	0,21 ± 0,04	1,73 ± 0,02

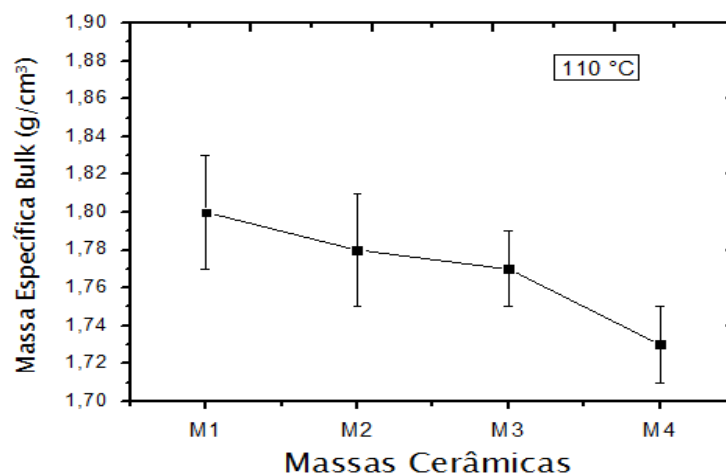
Observa-se na Figura 4.18 que houve uma variação na retração linear de secagem para as composições estudadas. O RCSM influenciou menos na M4, onde a retração foi menor 0,21%. E foi aumentando gradativamente para as outras composições, inclusive na M1.

Pode-se observar na Figura 4.19 que o RCSM influenciou consideravelmente na massa específica aparente das peças secas. A massa cerâmica (M4) com RCSM apresenta uma densificação menor comparada com a massa de referência (M1) e as

demais massas incorporadas com resíduo de cinza (M2 e M3). Isto confirma com a análise granulométrica para esse resíduo que apresenta partículas grosseiras, contribuindo com a diminuição do grau de empacotamento da peça. Já as massas M2 e M3 obtiveram uma densidade maior, verificando que esse percentual de RSCSM nessas massas, em substituição do quartzo natural, pode colaborar para o maior empacotamento das peças, aumentando sua densificação. Enquanto para M1 pode-se observar que houve uma densificação maior que as massas que tiveram adição de resíduo. Este fato pode ter ocorrido devido a granulometria um pouco grosseira para o caulim 72,7%.



**Figura 4.18-** Retração linear das peças secas a 110°C.



**Figura 4.19-** Massa específica *Bulk* das peças secas a 110°C.

#### 4.3.2- Avaliação das propriedades tecnológicas após queima.

Com finalidade de identificar a qualidade das peças para piso cerâmico vitrificado foram determinadas neste trabalho as seguintes propriedades de interesse tecnológico: absorção de água, retração linear, massa específica aparente, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão.

Na Tabela 4.9 são apresentados os valores de absorção de água (AA) das peças cerâmicas incorporadas com até 10,0% em peso de RCSM, sinterizadas entre 1190°C à 1250°C. Para melhor visualização do efeito da adição do resíduo e da temperatura de sinterização, foi construído o gráfico da absorção de água, conforme mostrado na Figura 4.20.

**Tabela 4.9-** Absorção de água das peças cerâmicas.

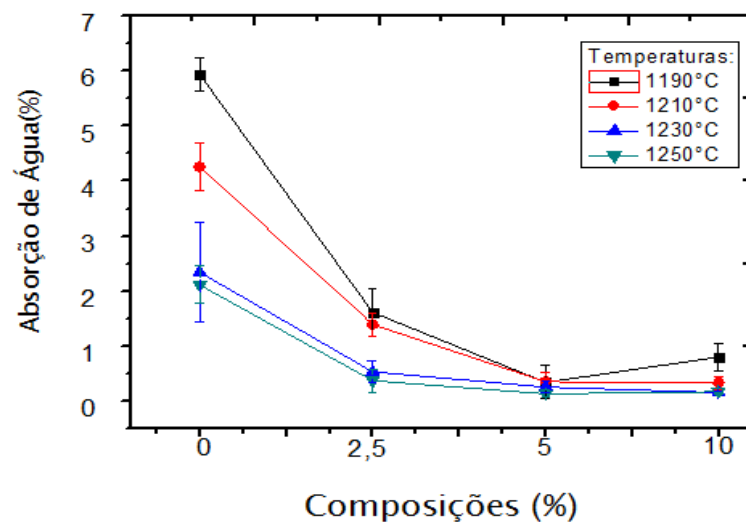
Massas Cerâmicas	Temperaturas (°C)			
	1190°C	1210°C	1230°C	1250°C
<b>Absorção de água (%)</b>				
<b>M1</b>	5,94 ± 0,31	4,26 ± 0,43	2,34 ± 0,91	2,11 ± 0,34
<b>M2</b>	1,61 ± 0,43	1,39 ± 0,21	0,53 ± 0,21	0,37 ± 0,21
<b>M3</b>	0,34 ± 0,30	0,35 ± 0,16	0,25 ± 0,10	0,13 ± 0,08
<b>M4</b>	0,80 ± 0,26	0,33 ± 0,13	0,15 ± 0,03	0,17 ± 0,05

Os resultados mostram que os valores de absorção de água das peças cerâmicas foram bastante influenciados pela adição do RCSM e pela temperatura de sinterização. À medida que há incorporação de RCSM, a absorção de água diminui. Isso ocorre porque há um maior grau de sinterização para todas as peças, tendo seu melhor resultado na massa M3 com adição de 5,0% em peso que apresentou menor de absorção de 0,13% em 1250°C.

Segundo as normas EN 176, ISO 13006 e ABNT para absorção de água, os corpos de prova sinterizados na temperatura de 1190°C com adição de 0% de cinza pode ser classificado como semi-grês. Enquanto que os corpos de prova das massas M2 com adição de 2,5% de cinza e M4 com adição de 10,0% de cinza respectivamente, nesta temperatura, podem ser classificados como grês porcelanato. Na temperatura de 1210°C, os corpos de prova tem a mesma classificação em relação à temperatura anterior citada, com as adições de 0% de cinza a 5,0% de cinza. O que não ocorre com os corpos de prova com adição de

10,0% de cinza, pois podem ser classificados como porcelanato, conforme a NBR 13818( ABNT, 1997). Já na temperatura de 1230°C, os corpos de prova de 0% de cinza e 2,5% de cinza podem ser classificados como grês porcelanato e os com adição de 5,0% e 10,0% de resíduo podem ser classificados como porcelanatos. E finalmente, na temperatura de 1250°C, os corpos de prova com adição de 0% pode ser classificado como grês porcelanato e os corpos de prova com adição de RCSM entre 2,5% e 10,0% podem ser classificados como porcelanatos.

A absorção de água é um dos parâmetros dos revestimentos cerâmicos, que permitem seu enquadramento com segurança no contexto das normas nacionais e internacionais.



**Figura 4.20-** Absorção de água das peças cerâmicas preparadas em função da adição do resíduo e temperatura de sinterização.

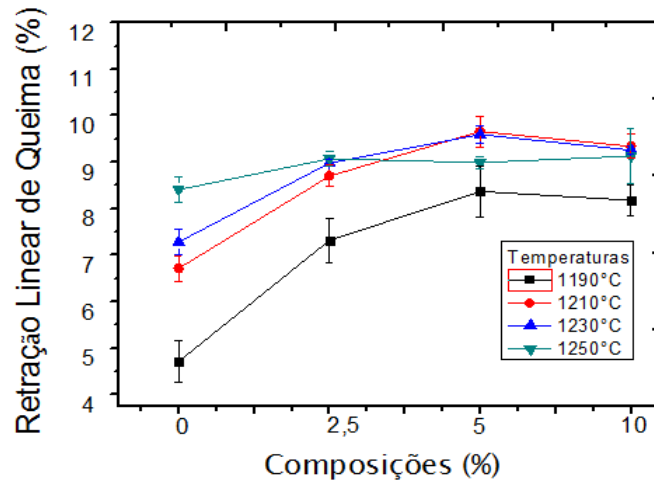
Na Tabela 4.10 são apresentados os valores de retração linear de queima (RLq) das peças cerâmicas com adição de até 10,0% de RCSM, sinterizadas entre 1190°C à 1250°C. Para melhor visualização do efeito da adição do resíduo e da temperatura de sinterização, foi construído o gráfico da retração linear, conforme mostrado na Figura 4.21.

**Tabela 4.10-** Retração linear (RLq) das peças cerâmicas.

Massas Cerâmicas	Temperaturas (°C)			
	1190°C	1210°C	1230°C	1250°C
<b>Retração Linear (%)</b>				
<b>M1</b>	4,71 ± 0,46	6,71 ± 0,27	7,28 ± 0,28	8,41 ± 0,28
<b>M2</b>	7,32 ± 0,48	8,70 ± 0,23	8,98 ± 0,08	9,07 ± 0,15
<b>M3</b>	8,37 ± 0,55	9,66 ± 0,33	9,59 ± 0,18	8,99 ± 0,13
<b>M4</b>	8,18 ± 0,33	9,34 ± 0,26	9,26 ± 0,09	9,13 ± 0,59

A Figura 4.21 apresenta resultados de retração linear das peças cerâmicas sinterizadas e incorporadas com até 10,0% em peso de RCSM. Os resultados mostram que a retração linear é influenciada tanto pela adição do resíduo como pela temperatura de sinterização. Em 1190°C a massa M1 apresenta RLq iguala 4,71%, enquanto que nas massas M2 ( adição de 2,5% em peso) e M3 (adição de 5,0% em peso) tem um aumento gradativo de respectivamente 7,32% e 8,37%. Já a M4 (com adição de 10,0% em peso) diminui um pouco a RLq em relação a M3. Em 1210°C a massa referência (M1) apresenta uma RLq de 6,71%. Nesta temperatura podemos observar que a maior retração ocorreu com a M3 com 9,66% de RLq. E novamente a M4 tem um valor menor em relação a M3 de 9,34%. Em 1230°C e 1250°C a retração segue o mesmo comportamento anterior. Isto indica claramente que o RCSM utilizado tende a influenciar o grau de sinterização das peças cerâmicas. As razões para isso estão relacionadas principalmente às suas composições químico-mineralógicas. Quando comparado com o quartzo, o resíduo cinza de serragem da madeira possui óxido de cálcio (CaO) e magnésio (MgO) que são agentes fundentes e tendem a diminuir a refratariedade das peças, contribuindo para maior densificação das peças cerâmicas. O RCSM também possui em menor quantidade Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e K<sub>2</sub>O que também são agentes fundentes.

**Figura 4.21-** Retração linear de queima em função da adição do resíduo e da temperatura de sinterização.

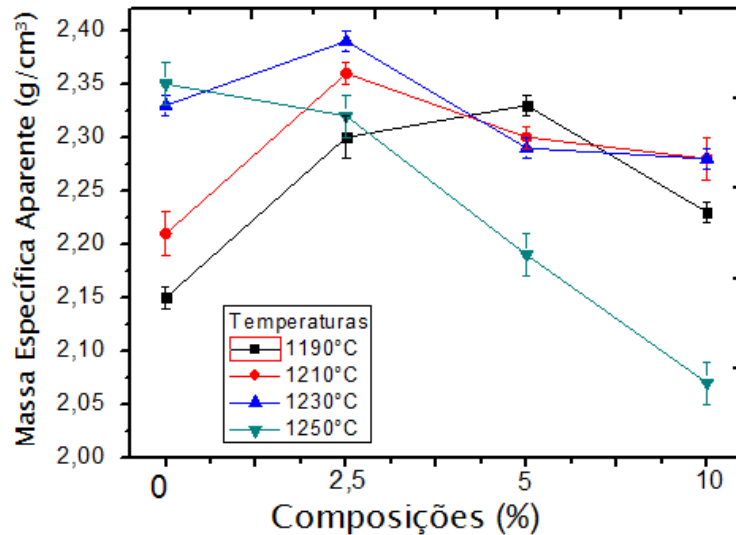


Na Tabela 4.11 são apresentados os valores de massa específica aparente (MEA) das peças cerâmicas com adição de até 10,0% de RCSM, sinterizadas entre 1190°C à 1250°C. Para melhor visualização do efeito da adição do resíduo e da temperatura de sinterização, foi construído o gráfico da massa específica aparente, conforme mostrado na Figura 4.22.

**Tabela 4.11 –** Massa específica Aparente (MEA) das peças cerâmicas.

Massas Cerâmicas	Temperaturas (°C)			
	1190°C	1210°C	1230°C	1250°C
<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>				
<b>M1</b>	2,15 ± 0,01	2,21 ± 0,02	2,33 ± 0,01	2,35 ± 0,02
<b>M2</b>	2,30 ± 0,02	2,36 ± 0,01	2,39 ± 0,01	2,32 ± 0,02
<b>M3</b>	2,33 ± 0,01	2,30 ± 0,01	2,29 ± 0,01	2,19 ± 0,02
<b>M4</b>	2,23 ± 0,01	2,28 ± 0,02	2,28 ± 0,01	2,07 ± 0,02

**Figura 4.22** - Massa específica aparente em função da adição do resíduo e da temperatura de sinterização.



Fazendo a comparação das massas em relação à adição de resíduo e temperatura de sinterização, observamos que o efeito da temperatura de queima foi o de aumentar a massa específica aparente, para massa M1 (0% em peso) e para massa M2 (2,5% em peso) do teor de RCSM incorporado. Este comportamento está basicamente relacionado com a maior formação de fase líquida com o aumento da temperatura de sinterização. Do mesmo modo, acontece uma melhor distribuição desta fase no interior da peça cerâmica. Para massa M3 (5,0% em peso) e massa M4 (10,0% em peso) de RCSM, o efeito foi o contrário, diminuiu a massa específica aparente à medida que aumentou a temperatura em consequência da baixa viscosidade da fase líquida em altas temperaturas promover a formação de porosidade fechada. A massa M4 manteve o mesmo valor da massa específica aparente (2,28 g/cm<sup>3</sup>) nas temperaturas 1210°C e 1230°C.

Na Tabela 4.12 são apresentados os valores de porosidade aparente (PA) das peças cerâmicas incorporadas com até 10,0% em peso de RCSM sinterizadas entre 1190°C a 1250°C. Para melhor visualização do efeito da adição do resíduo e da temperatura de sinterização, foi construído o gráfico da porosidade aparente, conforme mostrado na Figura 4.23.

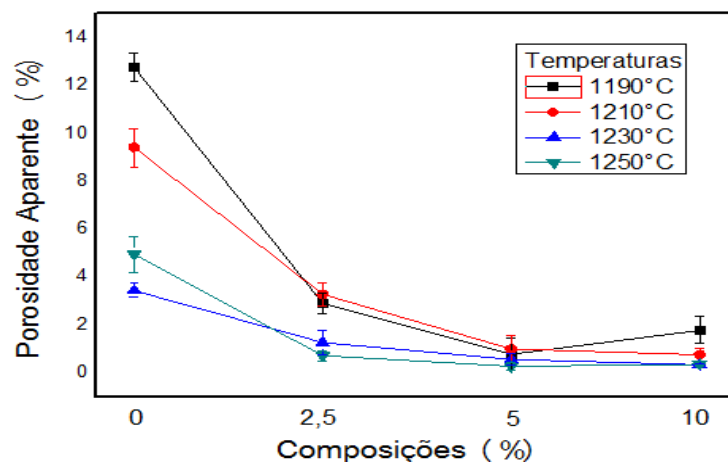


Tabela 4.12 – Porosidade aparente (PA) das peças cerâmicas.

Massas Cerâmicas	Temperaturas (°C)			
	1190°C	1210°C	1230°C	1250°C
<b>Porosidade aparente (%)</b>				
<b>M1</b>	12,76 ± 0,61	9,41 ± 0,89	3,44 ± 0,29	4,95 ± 0,76
<b>M2</b>	2,91 ± 0,42	3,28 ± 0,49	1,27 ± 0,49	0,72 ± 0,21
<b>M3</b>	0,78 ± 0,68	1,00 ± 0,56	0,57 ± 0,23	0,28 ± 0,16
<b>M4</b>	1,78 ± 0,57	0,76 ± 0,29	0,34 ± 0,07	0,36 ± 0,11

A porosidade aparente está relacionada à quantidade de poros que se formam durante a queima nas peças cerâmicas. E os resultados de porosidade estão mostrados na Figura 4.23.

Podemos observar o comportamento da porosidade aparente em função da temperatura de sinterização e percentual de RCSM adicionado na massa cerâmica. Fazendo uma comparação das massas podemos visualizar que entre as massas M1 e massa M4 houve uma diminuição significativa nos valores de porosidade aparente nas temperaturas de sinterização tendo uma variação. Em 1190°C (12,76 % para M1 e 1,78% para M4), na temperatura de 1210°C (9,41% para M1 e 0,76% pra M4), na temperatura de 1230°C (3,44% para M1 e 0,34% para M4) e em 1250°C (4,95% para M1 e 0,36% para M4). O comportamento da porosidade aparente segue o comportamento da absorção de água.



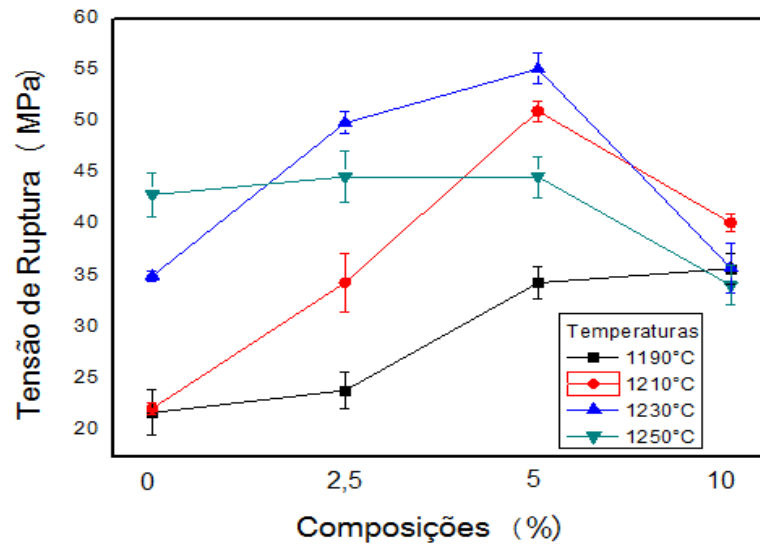
**Figura 4.23-** Porosidade aparente em função da adição de resíduo e da temperatura de sinterização

Na Tabela 4.13 são apresentados os valores de resistência à flexão das peças cerâmicas incorporadas com até 10,0% em peso de RCSM sinterizadas entre 1190°C á 1250°C. Para melhor visualização do efeito da adição do resíduo e da temperatura de sinterização, foi construído o gráfico de resistência à flexão, conforme mostrado na Figura 4.24.

**Tabela 4.13-** Resistência à flexão das peças cerâmicas.

Massas Cerâmicas	Temperaturas (°C)			
	1190°C	1210°C	1230°C	1250°C
<b>Tensão de ruptura a flexão (MPa)</b>				
<b>M1</b>	21,79 ± 2,20	22,19 ± 0,55	35,08 ± 0,48	42,98 ± 2,15
<b>M2</b>	23,95 ± 1,77	34,43 ± 2,89	49,97 ± 1,08	44,73 ± 2,48
<b>M3</b>	34,41 ± 1,63	51,09 ± 1,04	55,21 ± 1,51	44,71 ± 1,99
<b>M4</b>	35,78 ± 1,54	40,25 ± 0,88	35,86 ± 2,40	34,16 ± 1,92

Na Figura 4.24 é mostrada a influência do tipo de massa e da temperatura de sinterização sobre a tensão de ruptura à flexão dos corpos cerâmicos obtidos. Pode ser observado que os valores desta propriedade aumentaram à medida que foi aumentado o percentual de resíduo incorporado à massa cerâmica de referência M1 (variando de 21,79 a 42,98 MPa). Com o aumento da temperatura de sinterização para 1210°C, os valores de tensão de ruptura aumentaram ainda mais (22,19 a 51,09 MPa para massa M1 a massa M3), e diminui para 40,25 MPa na massa M4. Devido a maior formação de fase líquida que resulta numa maior densificação dos corpos cerâmicos. Nas temperaturas de 1230°C e 1250°C ocorrem oscilações nos valores de tensão de ruptura à flexão. O valor máximo foi de 55,21 MPa ocorrido à temperatura de 1230°C na massa M3 (5% em peso de resíduo). Apesar destas variações, todas as massas cerâmicas obtiveram resultados satisfatórios sendo classificadas quanto a esta propriedade segundo a NBR 13818 como grês porcelanato, grês ou semi-grês, dependendo da temperatura de queima e teor de resíduo adicionado.

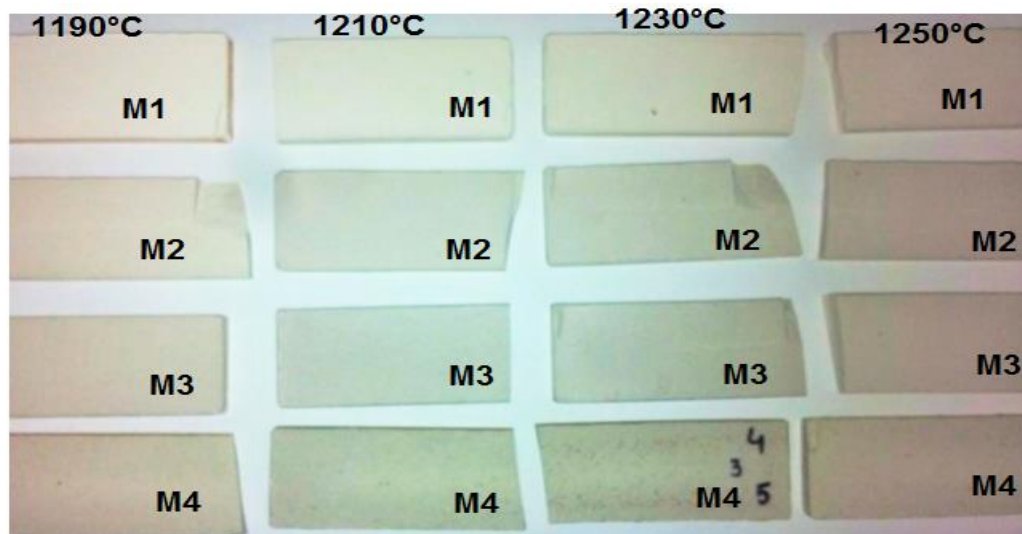


**Figura 4.24-** Resistência à flexão em função da adição do resíduo e da temperatura de sinterização.

#### **4.4- Efeito da valorização do resíduo cinza da serragem de madeira (RCSM) nas peças cerâmicas após queima**

Neste trabalho o resíduo de cinza de serragem de madeira (RCSM) foi gradualmente incorporado na massa, substituindo o quartzo, para produção de peças de piso cerâmico vitrificado. Uma característica importante dos corpos cerâmicos é a cor após a sinterização.

Na Figura 4.25, nota-se que a massa M1 (massa de referência- 0% em peso de resíduo) isenta de resíduo, após a sinterização apresenta cor clara. Trata-se de uma massa cerâmica para piso vitrificado tipicamente de queima clara. Pode-se observar também que a substituição do quartzo pelo resíduo cinza de serragem de madeira tende mudar a tonalidade dos corpos cerâmicos. Isto é mais acentuado a partir da massa M3 (com 5,0% em peso de resíduo). Verifica-se o escurecimento da tonalidade com a adição do resíduo, devido à substituição do quartzo que é branco pelo resíduo que é cinza. Além disso, segundo a Tabela 4.1, o resíduo possui maior quantidade e óxido de cálcio e óxido de ferro que o quartzo, apesar do óxido de cálcio ser um material reativo em composições de piso vitrificado.



**Figura 4.25-** Corpos de prova das massas M1 (0% em peso de resíduo), M2(2,5% em peso de resíduo), M3(5% em peso de resíduo) e M4(10% em peso de resíduo) sinterizados entre as temperaturas de 1190°C a 1250°C.

#### **4.5- Piso cerâmico vitrificado incorporado com resíduo cinza da serragem de madeira**

Com base nos resultados apresentados anteriormente, pode-se avaliar a viabilidade do uso das massas cerâmicas analisadas para a fabricação de piso cerâmico vitrificado. Serão usadas duas propriedades normalmente utilizadas em normas técnicas para fabricação de pisos cerâmicos: absorção de água (AA) e tensão de ruptura à flexão ( $\sigma$ ).

Os revestimentos cerâmicos vitrificados para pisos fabricados por prensagem de acordo com a norma NBR 13818 (ABNT, 1997) podem ser classificados como mostrado nas Tabelas 2.1 e 2.2 respectivamente, absorção de água (AA) e tensão de ruptura à flexão ( $\sigma$ ).

Na Tabela 4.14 são apresentados os possíveis tipos de pisos vitrificados em termos de composição da massa cerâmica e da temperatura de sinterização.

**Tabela 4.14-** Tipos de pisos cerâmicos obtidos para massas cerâmicas preparadas.

<b>Massas Cerâmicas</b>	<b>1190°C</b>	<b>1210°C</b>	<b>1230°C</b>	<b>1250°C</b>
<b>M1</b>	BIIb	BIIa	BIb	Bla
<b>M2</b>	BIb	BIb	Bla	Bla
<b>M3</b>	Bla	Bla	Bla	Bla
<b>M4</b>	BIb	Bla	Bla	Bla

Pode-se verificar que a massa referência (M1) atinge as seguintes especificações de pisos em função da temperatura de sinterização: BIIb (1190°C), BIIa (1210°C), BIb (1230°C) e Bla (1250°C). À medida que o resíduo é substituído pelo quartzo na formulação da massa cerâmica, são obtidos pisos de melhor qualidade. Observa-se que a massa M2 (com 2,5% em peso) nas temperaturas de 1190°C e 1210°C podem ser classificados como BIb-grês e nas temperaturas 1230°C e 1250°C podem ser classificados como Bla-porcelanato. O melhor resultado acontece na massa M3 (com 5,0% em peso), onde em todas as temperaturas de sinterização ocorre a classificação de Bla-porcelanato. Quanto a massa M4 (com 10,0% em peso) pode-se observar a classificação BIb- grês para a temperatura de 1190°C enquanto que nas outras temperaturas todas as classificações são Bla-porcelanato. A diminuição da temperatura máxima de sinterização das peças vitrificadas apresenta uma importante economia para a indústria, pois um dos maiores custos do produto final acabado está relacionado ao gasto de energia elétrica durante o processo de sinterização dos pisos vitrificadas.

## CAPÍTULO 5- CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos nos diversos experimentos realizados neste trabalho, as seguintes conclusões poder ser destacadas:

- O resíduo de cinza de serragem de madeira fornecido pela Arte Cerâmica Sardinha, Campos dos Goytacazes-RJ usado neste trabalho se mostrou eficaz na substituição parcial ou total de quartzo na formulação de massas cerâmicas para fabricação de piso cerâmico vitrificado.
- O resíduo de cinza da serragem de madeira é composto de material fundente ( $K_2O$ ) que reduz a temperatura de queima e a porosidade do material cerâmico formando fase líquida e deste modo tendo um grande potencial para ser usado como matéria-prima alternativa para possível aproveitamento cerâmico.
- No presente trabalho foram formuladas, preparadas e caracterizadas quatro massas cerâmicas contendo 0, 2,5, 5,0 e 10,0 % em peso de RCSM, respectivamente. O resíduo de cinza de serragem de madeira incorporado à massa cerâmica modifica as características físico-química e mineralógica dela.
- As peças cerâmicas que foram formuladas com substituição parcial ou total do quartzo por RCSM (M2, M3 e M4) sinterizaram melhor que as peças cerâmicas formuladas sem a incorporação de resíduo (M1).
- Apesar de variações, todas as massas cerâmicas obtiveram resultados satisfatórios sendo classificadas quanto a absorção de água e tensão de ruptura à flexão, segundo a NBR 13818 como porcelanato, grês porcelanato, grês ou semi-grês, dependendo da temperatura de queima e teor de resíduo adicionado.
- A massa cerâmica com adição de 5,0% em peso de RCSM pode ser classificada como Bla-porcelanato, em todas as temperaturas de sinterização (1190°C a 1250°C).

- A massa cerâmica com a adição de 10% pode ser classificada como Blauporcelanato a partir da temperatura de 1210°C. Com isso, podemos concluir que, nesta temperatura as indústrias economizariam energia na queima dos corpos cerâmicos numa temperatura menor (1210°C) e estaríamos utilizando maior quantidade de resíduo de cinza de serragem de madeira.
- Finalmente, com base nos estudos realizados, a substituição do quartzo por resíduo de cinza de serragem de madeira em massa de piso cerâmico vitrificado, além de melhorar a qualidade do piso cerâmico, pode ser uma ótima alternativa para resolver o problema ambiental relacionado não só com a grande quantidade de resíduo de serragem de madeira como também da cinza gerada com a queima deste resíduo.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade deste trabalho, algumas sugestões são apresentadas a seguir:

Caracterização mineralógica e química das massas cerâmicas com 2,5%, 5,0% e 10,0% em peso de RCSM.

Caracterização estrutural e morfológica das peças cerâmicas sinterizadas por microscopia eletrônica de varredura.

Produzir corpos de prova substituindo o feldspato sódico (albita) por RCSM, em várias composições.

Avaliar o efeito da incorporação de diferentes granulometrias do RCSM na massa cerâmica.

Incorporar o RCSM em confecções de corpos de prova de materiais pozolônicos, analisando suas características físicas, químicas e mineralógicas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Abajo M. F. (2000)** " Manual sobre Fabricacion de Baldosas, Tejas y Ladrillos" Ed. Beralmar S. A, Barcelona.

**Albero, J. L. A. (2000)** A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e Sua Aplicação Industrial. Parte I: O Preenchimento das Cavidades do Molde. *Cerâmica Industrial*. V.5, Nº 5, P. 23-28.

**Albero, J. L. A. (2000)** A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e Sua Aplicação Industrial. Parte II: Compactação. *Cerâmica Industrial*. V.5, Nº 6, P. 14-40.

**Amaral, M. C. (2014)** Avaliação da Incorporação de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em tijolo solo-cimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) Fevereiro.

**American Society for testing and materials – ASTM (1989)**. Flexural Properties of ceramic Materials: C674 – 77. USA.

**American Society for testing and materials – ASTM (1994)**. Standard test method for Water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravit of fired whiteware products: C373 – 88. USA.

**Arantes, F.J.S., Galesi, D.F., Quinteiro, E., Boschi, A.O. (2001)**. O manchamento e a porosidade fechada de grês porcelanato. *Cerâmica Industrial*, V.6, Nº 03, P. 18-15.

**Araújo, J. F. (2008)** A influência da adição de caulim, quartzo e feldspato potássico na formulação de massas cerâmicas para telhas: Modelo Estatístico. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio do Norte.

**Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM (2016)**. Informações Técnicas. Disponível em: <http://www.abeceram.org.br> Acesso em: 2016.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1984)** Solo: Análise Granulométrica: NBR 7181-84. Rio de Janeiro- RJ.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1984b)** Solo: Determinação da Massa Específica Real: NBR 6508-84. Rio de Janeiro- RJ.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1984)** Solo: Determinação do Limite de Liquidez: NBR 6459 – 84. Rio de Janeiro – RJ.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1984)** Solo: Determinação do Limite de Plasticidade: NBR 7180 - 84. Rio de Janeiro- RJ.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1984).** Retração por secagem: MB - 305. Rio de Janeiro- RJ.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1984b)** Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica: NBR 6508-84. Rio de Janeiro-RJ

**Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997)** Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificações e Métodos de Ensaio: NBR 13818. Rio de Janeiro-RJ.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2007)** Placas Cerâmicas para Revestimento – Porcelanato. Rio de Janeiro-RJ.

**Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos – ANFACER (2016)** [http:// www.anfacer.org.br](http://www.anfacer.org.br) (2016)

**ASTM- C373/88 (1994).** Test method for water absorption, bulk density and apparent porosity.

**Barba, A., Beltrán, V., Feliú, C., Garcia, J., Ginés, F., Sánchez, E., Sanz, V. (2002)** Materias Primas Para la Fabricación de Soportes de Baldosas Cerámicas. 2ª Ed, Castellón – España, Instituto de Tecnología Cerámica – ITC, 292p.

**Beltran, V.; Blasco, A.; Escardino, A.; Negre, F. (1988)** “Formation of black core during the firing of floor and wall tiles” – Interceram n 3, p. 15.

**Beltran, V., Bagan, V., Sánchez, E., Negre, F. (1996)** Materias Primas Empleadas en la Fabricación de Baldosas de Pasta Blanca en España. *Tecnica Cerámica*. 196: 578-585.

**Bernardes, L.J.L., Vitti, E.D. (1994)** Via Seca o Processo Passo a Passo. *Mundo Cerâmico*. 10: 38-43.

**Biffi, G.(1997)** Il Grés porcellanto – Manuale di fabbricazione e tecniche di impiego. Itália: Gruppo Editoriale Faenza Editrice Spa, p.312..

**Borlini, M. C., Sales, H. F., Vieira, C. M. F., Conte, R. A., Pinatti, D. G., Monteiro, S. N. (2005).** Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. Parte I: Características da cinza. *Cerâmica*, v. 51, nº 319, p. 192 -196.

**Borlini, M. C., Vieira, C. M. F., Pinatti, D. G. et al ( 2006)** Análise microestrutural de cerâmica vermelha incorporada com cinza de lenha de eucalipto. Anais do 50º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Blumenau.

**Boschi, A. O. (2002)** Uma Análise Crítica do Setor de Revestimentos Cerâmicos. *Cerâmica Industrial* 7 (2), 8-13.

**Brito, E. O. (1995)** Estimativa da produção de resíduos na indústria brasileira de serraria e laminação de madeira. *Revista da Madeira*, Curitiba, ano IV, n. 26, p. 34-39.

**Carty, W.M., Senapati, U., (1998).** Porcelain – raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*. Science Direct. V.81, Nº 1, P. 3-20.

**Carty, W.M. (2002)** Observations on the glass phase composition in porcelains. *Ceramic Engineering and Science Proceedings* V. 23, nº 2: P. 79-94.

**Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (1988).** Resolução nº 006 de 15 de junho de 1988. Diário Oficial da União.

**Dantas, A. P. A, Acchar, W., Leite, J. Y. P., Araújo, F. S. D. (2010)** Utilização de resíduos de rochas ornamentais na produção de cerâmica branca. *Holos*, ano 26, vol. 1, p. 92-108.

**Damiani, J.C.; Perez, F.; Melchiades, F.G.; Boschi, A.O. (2001)** Coração negro em revestimentos cerâmicos: principais causas e possíveis soluções. *Cerâmica Industrial*, v6, p. 12-16.

**Dobrovolski, E. G. (1999)** Problemas, destinação e volume dos resíduos da madeira na indústria de serrarias e laminadoras da região de Irati-Pr. Ponta Grossa. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

**Dondi, M., Marsigli, M., Fabbri, B. (1997)**, Recycling of industrial and urban wastes in brick production – a review, *Tile & Brick International*, v. 13, p. 218-225.

**Dondi, M., Marsigli, M., Fabbri, B.(1998)**. Resenha das experiências de reciclagem de resíduos industriais e urbanos na produção de tijolos. *Cerâmica Informação, Faeza*, 1(1), 17 – 30p.

**Dondi, M., Ercolani G., Guarini G., Raimondo, M. (2002)** Orimulsion Fly Ash in Clay Bricks – part 1: composition and thermal behavior of ash, *Journal of the European Ceramic Society* 22: 1729-1735.

**Dondi, M., Guarini, G., Raimond, M., Venturi, I. (2002)** Orimulsion Fly Ash in Clay Bricks – *Journal of the European Ceramic Society* 22: 1737.

**Dondi, M., Guarini, G., Raimondo, M., Ruffini, A. (2002)** Orimulsion Fly Ash in Clay Bricks – part 3: chemical stability of ash-bearing products, *Journal of the European Ceramic Society* 22: 1749-1758.

**Elinwa, A. U., Mahmood, Y. A. (2002)** Ash from timber waste as cement replacement material, *Cement and Concrete Composites* v. 24, p. 219-222, abril.

**EMBRAPA (2010)** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n.8; novembro.

**Facincani, E.(1997)**. "Tecnologia em cerâmica – Los ladrillos". 3 ed. Barcelona: Faenza Editrice s.p.a.. Faenza, 198p.

**Faria, K.C.P. (2011)** Avaliação da Adição de Resíduo de Cinzas de Bagaço de Cana-de-açúcar nas Propriedades e Microestruturas de Cerâmica Vermelha. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). Fevereiro.

**Faria, K.C.P., Gurgel, R.F., Holanda, J.N.F.(2012)** Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks, *Journal of Environmental Management*, v. 101, p. 7-12.

**Faria, K. C. P. e Holanda, J. N. F. (2013)** Incorporation of sugarcane bagasse ash waste as an alternative raw material for red ceramic. *Cerâmica*, V. 59, n. 351, PP. 473-480

**Faria, K. C. P. (2015)** Formulação e Caracterização de Revestimento Poroso Utilizando Resíduo de Vidro Plano e Resíduo de Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). Fevereiro.

**Ferreira, L. C. (2012)** Potencial da Utilização de Resíduos Industriais na Formulação de Massa de Cerâmica Vermelha Para a Fabricação de Blocos de Vedação. Dissertação de Mestrado Urbano e Industrial. Universidade Federal do Paraná. Curitiba(PR).

**Freire, M. N. (2007)** Uso de Matérias-Primas Argilosas do Estado do Rio de Janeiro em Massas Cerâmicas para Porcelanato: Formulação, Propriedades Físicas e Microestrutura. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). Maio.

**Gardolinski, J.E., Filho, H. P. M., Whypych, F. (2003)** Comportamento Térmico da Caulinita Hidratada. *Química Nova*, Vol 26, 1:30-35.

**Glasser, F. P. (1989)** Chemical, mineralogical and microstructural changes occurring in hydrated slag-cement blends. The American Ceramic Society, Inc.

**Hausner, H. H. (1967)** Friction conditions in a mass of metal powder. *Intenation Journal of Powder Metallurgy*, v. 3, n.4, P. 7-13.

**Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2016)** Informações sobre madeiras: Disponível em: [http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/8.htm](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/8.htm)

**John, V. M.; Cincotto, M. A. (2007)** Gesso de construção civil. In: ISAIA, G. C. *Materiais de construção civil*. São Paulo: Ibracon, p. 727-760.

**Kingery, W. D., Browen, H. K., Uhlmann, D. R. (1975)** *Introduction to Ceramics*. 2<sup>a</sup> Edition, John Wiley and Sons, New York, USA, 295.

**Kuzmickas, L., Andrade, F. R. D. , Szabó, G. A. J. , Motta, J. F. M., Jr. Cabral, M. (2013)** Influence of diopside: feldspar ratio in ceramic reactions assessed by quantitative phase analysis (X-ray diffraction –Rietveld method), *Cerâmica*, São Paulo, v. 59, n. 350, junho.

**Laboratório do Centro Cerâmico do Brasil LabCCB (2012)**. Programa Setorial da Qualidade de Placas Cerâmicas para Revestimento. Relatório Setorial nº 004/2012, fevereiro.

**Leite, M. B, Molin, D. D. (2002)** Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D. *Sitientibus*, Feira de Santana –BA, n. 26, p. 111-130, janeiro/junho.

**Lolli, L., Nasseti, G., Marino, L. F. B. (2000)** A Preparação a Seco das Massas Cerâmicas. *Cerâmica Industrial* 5 (2) Março/Abril: 23-27.

**Luxán, M.P.; Madruga, F.; Saavedra, J.(1989)** Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cem. Concr. Res.* V. 19, p.63-69.

**Maia, F. S. (2011)** Avaliação das Massas Cerâmicas, Processamento e Propriedades dos Produtos de Cerâmica Vermelha do Pólo Cerâmico de Campos dos Goytacazes. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). Agosto.

**Manfredini T, Leonelli C. (1996)**, Vidrados vitro-cerâmicos para queima rápida, *Cerâmica Industrial* 01(03) Julho/Agosto.

**Más, E.(2002)**."Qualidade e Tecnologia em Cerâmica Vermelha". Editora Pólo Produções LTDA, São Paulo.(Apostilas).

**Manual de Métodos de Análise de solo (1997)** Embrapa - Centro Nacional de Pesquisas de Solos.2ª Edição. Rio de Janeiro.

**Medeiros E. N. M., (2010)** Uso da Técnica de Planejamento Experimental para Otimização de Massa Cerâmica com a Incorporação de Resíduos de Casca de Arroz, Cinza de Lenha e Lodo de ETA. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília. Brasília – DF, Julho.

**Melchiades, F. G., Machado, R., Boschi, A. (2002)** Caracterização de uma jazida de caulim de Campo Alegre (SC). *Cerâmica Industrial* 7(6), Novembro/Dezembro: 30-33.

**Melo, M.M. (2006)**. Formulação e caracterização de massas de grês porcelanato preparadas a partir de matérias-primas naturais do Rio Grande do Norte e com adição de chamote de telhas. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal - RN, 136f.

**Menezes, R. R.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C. (2002)** O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n. 2, p. 303-313.

**Menezes, R. R.; Ferreira, H.S.; Neves, G.A.; Ferreira, H.C. (2006)** Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção – revisão. *Cerâmica*, v. 52, p.37-49.

**Menezes, R.R.; Almeida, R.R.; Santana, L. N. L.; Neves, G.A.; Lira, H. L.; Ferreira, H.C. (2007)** Análise da Co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para a produção de blocos e telhas cerâmicos. *Cerâmica*, v. 53, p. 192-199.

**Metodologia da Embrapa Solos (2011)** Manual de Métodos de Análise de Solos. 2ª Edição. Revista Embrapa Solos, p. 13 a 229.

**Moreira, J. M. S.; Freire, M. N., Holanda, J. N. F. (2003).** Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, vol.49, n.312, pp. 262-267.

**Motta, J. F. M., Cabral Jr, M., Tanno, L. C., Zanardo, A. (2002).** As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. *Cerâmica Industrial* 7 (1) Janeiro/Fevereiro: 33-40

**Norton, F.H. (1973).** Introdução à Tecnologia Cerâmica. Ed. Edgard Blucher LTDA. São Paulo, 325 p.

**Oliveira, A. P. N. (2000)** Tecnologia de Fabricação de Revestimentos Cerâmicos. *Cerâmica Industrial* 5, 6: 37 - 47.

**Oliveira, G. E. H., J. N. F. (2004)** Análise do impacto ambiental causado pela utilização de resíduo sólido do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, vol.50, n.315, pp. 185-189.

**Paranhos, R.J.S., (2010).** Aproveitamento de Resíduos de Cinza de cana-de-açúcar em Massas Cerâmicas. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal - RN, 98f.

**Perez, E.J.A., Terradas, R., Manent, M.R., Seijas, M., Martinez, S., (1996)** Inertization of industrial wastes in ceramic materials, *Industrial Ceramics*, v. 16, n.1, p. 7-10.

**Pil Tai, W., Kimura, K., Jinnai, K., (2002)** Fabrication of New Porcelain Body Using Nonplastic Raw-Materials. *Journal of Materials Science* 37: 1273-1279.

**Pinheiro, B. C. A. (2005)** Análise microestrutural de Porcelana Tradicional. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 115 P.



**Pinto, M. F., Sousa, S. J. G., Holanda, J. N. F., (2005)** Efeito do ciclo de queima sobre as propriedades tecnológicas de uma massa cerâmica vermelha para revestimento poroso. *Cerâmica* V. 51. P. 225-229.

**Reed, J.S. (1995)**, Principles of Ceramic Processing, 2<sup>nd</sup> edition, Wiley Interscience, New York.

**Reis, J. P., (2007)** Incorporação de resíduos industriais em massa cerâmica usada na fabricação de tijolos. Dissertação de mestrado Programa CCT/UDESC. Joinville.

**Revista da Madeira- REMADE (2005)** Bioenergia. Energia Limpa e Abundante. Curitiba, Lettech Editora e Gráfica Ltda.

**Riella, H. G.; Franjdlich, E. U. de C.; Durazzo, M.(2002)** Caracterização e utilização de fundentes em massas cerâmicas. *Revista Cerâmica Industrial*, v. 7, 3, p. 33-36, mai/jun

**Saber Web (2010)** Informações Técnicas.  
<http://www.saberweb.com.br/minerais/quartzo.htm> (acessado em 20/01/2016)

**Sánchez, E., (2003) A.** Considerações Técnicas sobre Produtos de Revestimento Porcelânico e seus Processos de Manufatura. Parte I. *Cerâmica industrial*. V. 8. Nº 2, P. 7–16.

**Sánchez, E., (2003) B.** Considerações Técnicas sobre Produtos de Revestimento Porcelânico e seus Processos de Manufatura. Parte II. *Cerâmica industrial*. V. 8. Nº 3, P. 17–26.

**Sánchez-Muñoz, L., Cava, S. da S., Paskocimas, C.A., Cerisuelo, E. (2002)** Modelamento do Processo de Gresificação de Massas Cerâmicas de Revestimento. *Cerâmica* 48 (308) Out/Nov/Dez: 217-222.

**Santos, L. L. (2014)** Adição de Cinza da lenha de Algaroba (*Prosopis juliflora*) em Massa Cerâmica para Revestimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal da Paraíba. Fevereiro.

**Santos, P. S (1975).** Tecnologia de Argilas: aplicada às argilas brasileiras. São Paulo: Universidade de São Paulo, v. 2: Aplicações.

**Santos, P.S. (1989)** Ciência e Tecnologia de Argilas. 2ª Edição. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, v, 1 ,Setembro.

**Schettino, M. A. S. (2013)** Desenvolvimento de Grés Porcelanato Incorporado com Resíduo de Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar: Processamento, Propriedades e Microestrutura. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). Agosto.

**Segadães, A.M. (2006)** Use of phase diagrams to guide ceramic production from wastes, *Advances in Applied Ceramics*, v. 105, n. 1, p. 48-54, 2006.

**Sindicato dos Ceramistas de Campos (2013)**. Informações técnicas. <http://www.odiariodecampos.com.br/setor-ceramico-fortalecido-5070.html> (Acessado em 07/07/2015)

**Silva, S.P. (2001)** Balanço Mineral Brasileiro.

**Sousa F. J. P, Neves W. F., Alarcon O. E. (2004)**. Estudo da Viabilidade de Obtenção de Isoladores Elétricos a Partir de Resíduo de Esmaltação. *Cerâmica* V.50. P. 217 – 224

**Sousa, S. J.G. (2008)** Desenvolvimento de Massas Cerâmicas Processadas por Via Seca com Matérias - Primas do Norte Fluminense Visando a aplicação em Revestimento Poroso. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). Fevereiro.

**Souza, G. P., Holanda, J. N. F. (2003)**. Comportamento de Sinterização de Massas Argilosas Contendo Resíduo Proveniente do Setor Petrolífero. *Cerâmica*, V. 49. P. 128-132.

**Souza, G.P., Holanda, J.N.F., (2005)**. Densification behavior of petroleum waste bearing clay-based ceramic bodies, *Ceramics International*, V. 30, N. 1, p. 99-104.

**Souza, A.J., (2008)**. Estudo da substituição de fundente natural por resíduo de rocha ornamental em massa cerâmica para piso vitrificado. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Agosto.

**Souza, A. J; Pinheiro, B. C. A.; Holanda, J. N. F. (2011)** Efeito da adição de resíduo de rocha ornamental nas propriedades tecnológicas e microestrutura de piso cerâmico vitrificado. *Cerâmica*, São Paulo, v. 57, n.342 junho.

**Souza, A. J. , (2012).** Desenvolvimento microestrutural e de fases de piso cerâmico vitrificado incorporado com resíduo borra de petróleo encapsulada. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Novembro.

**Vieira, C. M. F., Monteiro, S. N., Filho, J. D. (2001).** Formulação de Massa de Revestimento Cerâmico com Argilas Plásticas de Campos dos Goytacazes (RJ) e Taguá (SP). *Cerâmica Industrial*. 6 (6) Novembro/Dezembro. Pág. 43.

**Vivona, D. (2000)** Visão, Desafios e Novos Rumos da Cerâmica de Revestimento. *Cerâmica Industrial* 5 (2) Março/Abril. Pág. 17.

**Weizenmann, M. et al. ( 2013)** Avaliação da incorporação de resíduo de gemas na massa cerâmica vermelha: um estudo de Caso. *Cerâmica*, São Paulo, v. 59, n.351.