



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**USO DA TÉCNICA DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL  
PARA OTIMIZAÇÃO DE MASSA CERÂMICA COM A  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CINZA DE CASCA  
DE ARROZ, CINZA DE LENHA E LODO DE ETA**

**ELISANDRA NAZARÉ MAIA DE MEDEIROS**

**ORIENTADORA: ROSA MARIA SPOSTO**

**CO-ORIENTADOR: GELMIRES DE ARAÚJO NEVES**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.TD 002A/10**

**BRASÍLIA/DF: JULHO – 2010**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**USO DA TÉCNICA DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL  
PARA OTIMIZAÇÃO DE MASSA CERÂMICA COM A  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CINZA DE CASCA DE  
ARROZ, CINZA DE LENHA E LODO DE ETA.**

**ELISANDRA NAZARÉ MAIA DE MEDEIROS**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof<sup>ª</sup> Rosa Maria Sposto, DSc (ENC-UnB)  
(Orientadora)**

---

**Prof. Gelmires de Araújo Neves, DSc (UFCG)  
(Co-Orientador)**

---

**Prof. João Henrique da Silva Rêgo, DSc (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Michele Tereza Marques Carvalho, DSc (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. João Fernando Dias, DSc (UFU)  
(Examinador Externo)**

---

**Prof. Neusa Maria Bezerra Mota, DSc (BMS Engenharia)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 23 DE JULHO DE 2010.**



## FICHA CATALOGRÁFICA

MEDEIROS, ELISANDRA NAZARÉ MAIA DE

Uso da técnica de planejamento experimental para otimização de massa cerâmica com a incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz, cinza de lenha e lodo de ETA. [Distrito Federal, 2010].

xvii, 149p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2010). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Produto cerâmico	2. Cinza de casca de arroz
3. Lodo ETA	4. Cinza de lenha
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MEDEIROS, E. N. M. (2010). Uso da técnica de planejamento experimental para otimização de massa cerâmica com a incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz, cinza de lenha e lodo de ETA. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Elisandra Nazaré Maia de Medeiros.

TÍTULO: Uso da técnica de planejamento experimental para otimização de massa cerâmica com a incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz, cinza de lenha e lodo de ETA.

GRAU: Doutor

ANO: 2010

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Elisandra Nazaré Maia de Medeiros  
SQN 216 Bloco J Apto 511, Asa Norte.  
70.875-100 Brasília – DF – Brasil.  
elisandra@unb.br



## AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre ter me guiado e dado entusiasmo para concluir este trabalho e não ter me deixando fraquejar em nenhum instante;

Aos meus pais que sempre me incentivaram e apoiaram nos meus estudos com palavras sábias e que se tornaram muito importantes para mim. A minha irmã Glauce pela amizade e carinho. A minha querida avó que sempre cuidou de mim com amor;

A orientadora, Dra, Rosa Maria Sposto pela valiosa orientação e acompanhamento em cada etapa do desenvolvimento desta pesquisa;

Ao co-orientador, Dr. Gelmires de Araújo Neves, pela confiança e disponibilidade dos laboratórios da UFCG-PB para realização total dos ensaios experimentais desta pesquisa;

A todos os professores da pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, pela competência e dedicação em seus ensinamentos;

Aos amigos do Instituto Federal de Brasília, em especial: Uchôa, Conceição, Izabel e Luís;

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da UnB, pelos momentos acadêmicos e de entretenimento, em especial: Aarão, Bernardo, Fernanda, Fábio, Gabriel, Helder, Maurício, Paulo e Soraya;

Aos amigos que mesmo distantes sempre pude contar: Wagner, Kazumi, Luciana, Natália, Lorena, Su, Sandro, Luciana e Márzio;

Aos meus queridos amigos de Campina Grande em especial: Romualdo, Lizzandra, Jozilene, André, Juliana, Ana, Henri pela cumplicidade e auxílio durante minha estadia na cidade;

Aos técnicos do Laboratório de Ensaios de Materiais da UnB, Severino e Xavier e do Laboratório de Geotecnia da UnB Vanilson, pelo auxílio na realização de parte dos ensaios experimentais desta tese.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro concedido durante o doutorado.



*"Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende."  
(Leonardo da Vinci)*



## RESUMO

### USO DA TÉCNICA DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA OTIMIZAÇÃO DE MASSA CERÂMICA COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CINZA DE LENHA, CASCA DE ARROZ E DE ETA.

**Autor:** Elisandra Nazaré Maia de Medeiros

**Orientadora:** Rosa Maria Sposto

**Co-orientador:** Gelmires de Araújo Neves

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, julho de 2010**

Nos últimos anos, os mais diversos setores industriais vêm sendo citados como fontes de poluição e contaminação do meio ambiente, devido à grande quantidade de resíduos gerados, que são frequentemente lançados diretamente no meio ambiente com impactos negativos nos ecossistemas. Entre esses resíduos podem ser citados os resíduos minerais, as cinzas volantes, os lodos de estações de tratamento de água e esgoto e outros, em virtude do enorme volume de resíduos gerados tanto durante a mineração como no processo e beneficiamento. A tendência atual é a busca de alternativas para o reaproveitamento desses resíduos, e a indústria da construção civil tem liderado a sua aplicação. A indústria de materiais cerâmicos, como a de cerâmica vermelha e de revestimento cerâmico, apresenta um grande potencial para absorver os resíduos sólidos industriais. Isto se dá em vista da grande quantidade de peças produzidas e da sua tolerância para a mudança de composição ou de suas matérias-primas. O presente trabalho tem como objetivo a incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz (CCA), lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) e cinza de lenha em massa cerâmica. Por meio do delineamento de misturas, da metodologia de superfície de resposta e da otimização gráfica estudaram-se as propriedades de absorção de água (AA), retração de queima (RQ) e o módulo de ruptura à flexão (MRF) das formulações preparadas com composições de CCA, lodo de ETA e cinza de lenha, e realizaram-se ensaios de caracterização ambiental e físico-mineralógicos, seguidos pelos ensaios tecnológicos em escala de laboratório. Os resultados possibilitaram delimitar várias composições que tornam possível a obtenção de massas cerâmicas com propriedades satisfatórias. Os resultados mostraram que é possível a obtenção de blocos e revestimentos cerâmicos com a adição de até 25% de resíduo em relação à massa cerâmica, atingindo uma temperatura de até 1150 °C.

Palavras-chave: Bloco cerâmico; cinza de casca de arroz; lodo de ETA; cinza de lenha.



## **ABSTRACT**

### **USE OF EXPERIMENTAL PLANNING TECHNIQUE TO CERAMIC MASS OPTIMIZATION WITH INCORPORATION OF WASTE ASH WOOD, RICE HUSK ASH AND SLUDGE FROM WATER TREATMENT**

**Author: Elisandra Nazaré Maia de Medeiros**

**Supervisor: Rosa Maria Sposto**

**Co-supervisor: Gelmires de Araújo Neves**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, July of 2010**

In recent years, several industrial sectors have been cited as sources of pollution and environmental contamination due to the large amount of waste generated, which are often posted directly in the environment with negative impacts on ecosystems. Among these wastes can be cited the mining waste, fly ash, the sludge from water and sewer treatment and others, because of the huge volume of waste generated during mining and processing as in the process. The current trend is to seek alternatives for the reuse of waste and construction industry has led to its application. The ceramics industry, as red ceramic and ceramic tile, has great potential to absorb the solid waste industry. This happens due to the large quantity of parts produced and their tolerance for change in composition or its raw materials. The essay's goal is to incorporate waste rice husk ash (CCA), sludge from water treatment (ETA) and ash wood in ceramic body. Through the mixture design, response surface methodology and graphics optimization, it was analyzed the properties of water absorption (AA), firing shrinkage (RQ) and the modulus of rupture (MRF) of the formulations prepared with compositions CCA, ETA sludge and ash wood, and held trials of environmental, physical and mineralogical characterization, followed by technological tests on laboratory scale. It was possible to delimit several compositions that make it possible to obtain ceramic bodies with satisfactory properties. The results showed that it is possible to obtain ceramic bricks and tiles with the addition of up to 25% waste in ceramic body until reaching a temperature of 1150 °C.

**Keywords:** ceramic block; rice husk ash, ETA sludge; ash wood.



## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	1
1.1 – IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
1.2 – ORIGINALIDADE DO TRABALHO	3
1.3 – OBJETIVO DO TRABALHO	3
1.4 – ESTRUTURA DA TESE	4
<b>2 – OS RESÍDUOS DE CINZA DE CASCA DE ARROZ, CINZA DA LENHA E LODO DE ETA</b>	6
2.1 – INTRODUÇÃO	6
2.1.1 – Legislação aplicável	11
2.2 – A CINZA DE CASCA DE ARROZ	13
2.2.1 – Generalidades	13
2.2.2 – A casca de arroz e a cinza da casca de arroz	16
2.3 – O LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA	20
2.3.1 – Aspectos gerais	20
2.3.2 – Lodos gerados em ETAs	22
2.3.3 – Geração de lodo de ETA	28
2.4 – A CINZA DA LENHA	29
2.4.1 – Generalidades	29
2.5 – A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM MATERIAIS CERÂMICOS	31
<b>3 – MATERIAIS CERÂMICOS</b>	34
3.1 – MICROESTRUTURA	34
3.1.1 – Introdução	34
3.1.2 – Estruturas cristalinas das fases cerâmicas	35
3.2 – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CERÂMICOS	36
3.3 – A INDÚSTRIA CERÂMICA	38
3.3.1 – Histórico	38
3.3.2 – Argilas para produtos cerâmicos	40
3.3.2.1 – Características das argilas	41
3.3.2.2 – Propriedades das argilas	42
3.4 – PROPRIEDADES DE BLOCOS E REVESTIMENTOS CERÂMICOS	46
3.4.1 – Absorção de água	46
3.4.2 – Porosidade	47
3.4.3 – Módulo de ruptura à flexão	47
3.5 – Classificação dos produtos cerâmicos	48
3.5.1 – Classificação de bloco cerâmico	48
3.5.2 – Classificação de revestimento cerâmico	48
<b>4 – PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS</b>	50
4.1 – O DELINEAMENTO DE MISTURAS	50
4.2 – METODOLOGIA DO DELINEAMENTO DE MISTURAS	51
<b>5 – MATERIAIS E MÉTODOS</b>	55
5.1 – MATERIAIS UTILIZADOS	55
5.1.1 – Matéria-prima	55



5.1.1.1 – Argila (A1)	55
5.1.1.2 – Argila (A2)	56
5.1.2 – Resíduos	56
5.1.2.1 – Cinza de casca de arroz	57
5.1.2.2 – Lodo de ETA	57
5.1.2.3 – Cinza de lenha	59
5.2 – MÉTODOS	60
5.2.1 – Ensaio de caracterização	60
5.2.1.1 – Caracterização ambiental	61
5.2.1.1.1 – Lixiviação de resíduos	61
5.2.1.1.2 – Solubilização de resíduos	62
5.2.1.2 – Caracterização física	63
5.2.1.2.1 – Análise granulométrica por difração de laser	63
5.2.1.2.1 – Limites de Atterberg	64
5.1.1.3 – Caracterização mineralógica	64
5.1.1.3.1 – Preparação das amostras	64
5.1.1.3.2 – Análise química	64
5.1.1.3.3 – Difração de raios X	65
5.1.1.3.4 – Análises térmicas	66
5.2.2 – Ensaio tecnológico	67
5.2.2.1 – Preparação das amostras	67
5.2.2.2 – Formulação das composições	69
5.2.2.3 – Estudo estatístico	72
5.2.2.4 – Ensaio preliminares	74
5.2.2.5 – Ensaio completos para revestimento cerâmico	75
5.2.2.6 – Ensaio completos para blocos cerâmicos	76
5.2.2.7 – Propriedades físicas	77
5.2.2.8 – Propriedades mecânicas	77
<b>6 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>78</b>
6.1 – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL	78
6.1.1 – Lixiviação de resíduos	78
6.1.2 – Solubilização de resíduos	79
6.2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	80
6.2.1 – Granulometria a laser dos materiais	80
6.2.2 – Limites de Atterberg das argilas	85
6.3 – CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	86
6.3.1 – Análise química dos materiais	86
6.3.2 – Análise térmica diferencial e gravimétrica	87
6.3.3 – Análise por difração de raios X dos materiais	90
6.4 – ENSAIOS PRELIMINARES	91
6.4.1 – Avaliação da absorção e do módulo de ruptura à flexão das composições	91
6.4.2 – Valores estatísticos relevantes	94
6.4.3 – Absorção de água	97
6.4.4 – Módulo de ruptura à flexão	98
6.4.6 – Retração de queima	99
6.4.4 – Sobreposição entre a absorção e o módulo de ruptura à flexão	116
6.5 – SELEÇÃO DE COMPOSIÇÕES	119
6.6 – ENSAIOS COMPLETOS	119
6.6.1 – Moldagem por prensagem para revestimento cerâmico	119



6.6.2 – Moldagem por prensagem para blocos cerâmicos	123
6.6.3 – Análise por difração de raios X das composições	128

<b>7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	136
7.1 – CONCLUSÕES	136
7.1.1 – Caracterização ambiental	136
7.1.2 – Caracterização física-mineralógica	136
7.2 – DELINEAMENTO DE MISTURAS: ESTUDO ESTATÍSTICO	137
7.3 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	137
7.3.1 – Revestimentos cerâmicos	137
7.3.2 – Blocos cerâmicos	138
7.4 – CONCLUSÃO FINAL	138
7.5 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	139
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	140



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros a serem identificados nos resíduos. (Fonte: Cheriaf et al,1997).	11
Tabela 2.2 – Produção anual de arroz por região e estado. (Fonte: CONAB, 2009)	14
Tabela 2.3 – Principais produtores mundiais de arroz. (FAO, 2005)	15
Tabela 2.4 – Porcentagem de cinza em peso de alguns cereais. (Fonte: Mehta, 1992)	17
Tabela 2.5 - Característica dos resíduos em função do teor de sólidos (Fonte: Russell e Peck, 1997)	27
Tabela 3.1 – Propriedades dos principais elementos constituintes das argilas. (Fonte: Kazmierczak, 2007)	43
Tabela 3.2 – Composição granulométrica recomendada para a confecção de produtos de cerâmica vermelha. (Fonte: Pracidelli e Melchiades, 1997)	44
Tabela 3.3 – Classificação dos revestimentos cerâmicos. (Fonte: ABNT NBR 13817, 1997)	49
Tabela 5.1 – Composições A obtida através do planejamento em rede simplex {3,2} com ponto central para as formulações	70
Tabela 5.2 – Composições B obtidas através do planejamento em rede simplex {3,2} com ponto central para as formulações	70
Tabela 6.1 – Resultados dos ensaios de lixiviação dos resíduos	79
Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios de solubilização dos resíduos	80
Tabela 6.3 – Distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas estudadas	81
Tabela 6.4 – Limites de Atterberg das amostras de argilas	85
Tabela 6.5 – Análise química dos materiais em estudo	86
Tabela 6.6 – Valores da absorção de água (AA) e módulo de ruptura à flexão (MR) das composições A	92
Tabela 6.7 – Valores da absorção de água (AA) e módulo de ruptura (MR) das composições B	93
Tabela 6.8 – Estatísticas relevantes da análise de variância das variáveis de absorção de água (AA), módulo de ruptura (MRF) e retração de queima (RQ) para a composição A	94



Tabela 6.9 – Estatísticas relevantes da análise de variância das variáveis de absorção de água (AA), módulo de ruptura (MRF) e retração de queima (RQ) para a composição B	95
Tabela 6.10 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura de 800 °C	95
Tabela 6.11 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura de 900 °C	96
Tabela 6.12 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura de 1000 °C	96
Tabela 6.13 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura na temperatura de 800 °C	96
Tabela 6.14 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura na temperatura de 900 °C	97
Tabela 6.15 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura na temperatura de 1000 °C	97
Tabela 6.16 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos-de-prova cerâmicos após moldagem por prensagem	120
Tabela 6.17 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos-de-prova cerâmicos após moldagem por extrusão	125



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclo fechado de reciclagem de materiais. (Fonte: Antunes, 2001)	9
Figura 2.2 – Ciclo aberto de reciclagem de materiais. (Fonte: Antunes, 2001)	9
Figura 2.3 – Fluxograma de aplicação de CCA a partir do beneficiamento do arroz. (Fonte: Malhorta e Mehta, 1996).	17
Figura 2.4 – Depósito de cinza da casca de arroz ao longo de estrada vicinal em Santa Catarina. (Fonte: Santos, 1997).	18
Figura 2.5 – Vista de um aterro com cinza de casca de arroz residual. (Fonte: Pouey, 2006).	19
Figura 2.6 – Esquema de um sistema de abastecimento de água. (Fonte: CAESB, 2009)	24
Figura 2.7 – Resíduos gerados em ETAs com tratamento completo e com filtração direta. (Fonte: Guimarães 2007)	26
Figura 2.8 – Cinza gerada pelo consumo de lenha em indústria cerâmica de Goiás	30
Figura 3.1 – Dilatação térmica de alguns materiais de construção (Fonte: Cascudo, 2007 adaptada de Van Vlack, 1973)	37
Figura 4.1 – Espaço experimental para processos com três variáveis	52
Figura 4.2 – Arranjos simplex para três componentes. a) sem ponto centróide. b) com ponto centróide. (Fonte: Cornell, 1990)	53
Figura 5.1 – Argila armazenada na indústria de cerâmica vermelha de São Sebastião/DF	56
Figura 5.2 – Cinza de casca de arroz utilizada na pesquisa	57
Figura 5.3 – Centrífuga da unidade de desidratação de lodo da ETA-Descoberto	58
Figura 5.4. a) Saída do lodo pela rosca transportadora. b) Caçambas com lodo dispostas na ETA-Descoberto	59
Figura 5.5 – Cinza de lenha de uma indústria cerâmica de Goiás	59
Figura 5.6 – Fluxograma com as etapas dos ensaios de caracterização	61
Figura 5.7 – Granulômetro à laser CILAS 1064	63
Figura 5.8 – Espectrofotômetro de fluorescência de raios X SHIMAZDU EDX 720	65
Figura 5.9 – Difratômetro de raios X SHIMADZU XRD6000	66
Figura 5.10 – Analisador térmico RB 3000	67



Figura 5.11 – Fluxograma das etapas de ensaios dos materiais para aplicação em blocos e revestimentos cerâmicos	68
Figura 5.12. a) Esquema das formulações no diagrama ternário. b) Composição A obtidas através do planejamento em rede simplex {3,2} com ponto central para as formulações	71
Figura 5.13. a) Esquema das formulações no diagrama ternário. b) Composição B obtidas através do planejamento em rede simplex {3,2} com ponto central para as formulações	72
Figura 5.14. a) Molde para a confecção de corpos-de-prova. b) Prensa hidráulica para a conformação de corpos-de-prova	74
Figura 5.15 – Forno utilizado para a queima dos corpos-de-prova. a) Vista frontal. b) Vista interna	75
Figura 5.16 – Maromba de laboratório Modelo 51 da Marca VERDÉS. a) Vista geral. b) Vista com detalhe da extrusão	76
Figura 5.17 – Máquina universal de ensaios SHIMADZU AG-X50	77
Figura 6.1 – Distribuição do tamanho de partículas da argila A1	82
Figura 6.2 – Distribuição do tamanho de partículas da argila A2	83
Figura 6.3 – Distribuição do tamanho de partículas da CCA	83
Figura 6.4 – Distribuição do tamanho de partículas do lodo de ETA	84
Figura 6.5 – Distribuição do tamanho de partículas da cinza de lenha	85
Figura 6.6 - Análise térmica diferencial da A1	87
Figura 6.7 - Análise térmica diferencial da A2	88
Figura 6.8 - Análise térmica diferencial do lodo de ETA	89
Figura 6.9 – Difração de raios X dos materiais	90
Figura 6.10 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 800 °C para a composição A	100
Figura 6.11 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 800 °C para a composição B	101
Figura 6.12 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 900 °C para a composição A	102
Figura 6.13 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 900 °C para a composição B	103



Figura 6.14 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 1000 °C para a composição A	104
Figura 6.15 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 1000 °C para a composição B	105
Figura 6.16 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 800 °C para a composição A	106
Figura 6.17 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 800 °C para a composição B	107
Figura 6.18 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 900 °C para a composição A	108
Figura 6.19 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 900 °C para a composição B	109
Figura 6.20 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 1000 °C para a composição A	110
Figura 6.21 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 1000 °C para a composição B	111
Figura 6.22 – Superfícies de resposta para a retração após queima a 900 °C para a composição A	112
Figura 6.23 – Superfícies de resposta para a retração após queima a 900 °C para a composição B	113
Figura 6.24 – Superfícies de resposta para a retração após queima a 1000 °C para a composição A	114
Figura 6.25 – Superfícies de resposta para a retração após queima a 1000 °C para a composição B	115
Figura 6.26 - Sobreposição das superfícies de resposta da absorção de água e do módulo de ruptura após queima a 800 °C para a composição A	116
Figura 6.27 - Sobreposição das superfícies de resposta da absorção de água e do módulo de ruptura após queima a 900 °C. a) Composição A. b) Composição B	117
Figura 6.28 - Sobreposição das superfícies de resposta da absorção de água e do módulo de ruptura após queima a 1000 °C. a) Composição A. b) Composição B	118
Figura 6.29 – Absorção de água nas composições A, B e C para as temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C	121



Figura 6.30 – Porosidade aparente nas composições A, B e C para as temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C	121
Figura 6.31 – Densidade aparente nas composições A, B e C para as temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C	122
Figura 6.32 – Módulo de ruptura à flexão nas composições A, B e C para as temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C	123
Figura 6.33 – Aspecto visual das composições A, B e C para as temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C	123
Figura 6.34 – Absorção de água nas composições A, A1, B e C para as temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C	125
Figura 6.35 – Porosidade aparente nas composições A, A1, B e C para as temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C	126
Figura 6.36 – Densidade aparente nas composições A, A1, B e C para as temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C	127
Figura 6.37 – Módulo de ruptura à flexão nas composições A, A1, B e C para as temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C	127
Figura 6.38 – Aspecto visual dos corpos-de-prova incorporados com resíduos e conformados pelo processo de extrusão	128
Figura 6.39 – Difratoograma de raios X da composição A na temperatura de 1150 °C	129
Figura 6.40 – Difratoograma de raios X da composição B na temperatura de 1150 °C	130
Figura 6.41 – Difratoograma de raios X da composição C na temperatura de 1150 °C	131
Figura 6.42 – Difratoograma de raios X da composição A na temperatura de 1000 °C	132
Figura 6.43 – Difratoograma de raios X da composição A1 na temperatura de 1000 °C	133
Figura 6.44 – Difratoograma de raios X da composição B na temperatura de 1000 °C	134
Figura 6.45 – Difratoograma de raios X da composição C na temperatura de 1000 °C	135



## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AA	Índice de absorção
Å	Angstrom
ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Da	Densidade Aparente
DF	Distrito Federal
FAO	Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação
FUNMINERAL	Fundo de Fomento à Mineração
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
ml	Mililitro
mm	Milímetro
µm	Micrômetro
MPa	Mega Pascal
MRF	Módulo de Ruptura à Flexão
Pa	Porosidade Aparente
RQ	Retração de Queima
RS	Rio Grande do Sul
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
°C	Grau Celsius

# **1 – INTRODUÇÃO**

## **1.1 – IMPORTÂNCIA DO TEMA**

Atualmente, existe uma clara preocupação por parte dos governantes, empresários e ambientalistas devido a quantidade crescente de resíduos industriais. O aproveitamento de resíduos, além de minimizar os problemas ambientais, é visto atualmente como atividade complementar, que pode contribuir para a diversificação dos produtos e para a diminuição do custo final.

A crescente preocupação com o impacto ambiental, em função do grave problema ecológico causado pela falta de soluções adequadas para os resíduos industriais, tem incentivado pesquisas no sentido de viabilizar seu aproveitamento na produção de materiais e componentes para a construção civil. A reciclagem de resíduos visa contribuir, além do aspecto ambiental, a economia de matérias-primas.

O beneficiamento de matérias-primas e a fabricação de produtos geram resíduos que, muitas vezes, são agressivos ao meio ambiente. A destinação adequada desses resíduos deve ser objetivo constante do setor produtivo. As cinzas volantes são exemplos de produtos cujos valores mudaram com o tempo, já que têm agora aplicações úteis, tendo sido promovidas a materiais residuais.

Segundo Hendriks (2000), resíduo é o material que a princípio tem valor positivo e é adequado para reciclagem ou reutilização, após coleta e tratamento. Em outras palavras, está apto para entrar novamente no ciclo. Depois do tratamento, os materiais e/ou componentes oriundos de resíduos se tornam matérias-primas secundárias.

As pesquisas sobre a reciclagem de resíduos industriais têm sido a alternativa mais viável para o seu reaproveitamento nestes últimos anos, no Brasil e no Exterior. O uso de resíduos em massas cerâmicas, visando a obtenção de artefatos para usos diversos, também pode ser considerado uma boa solução uma vez que contribui para a redução do uso das matérias-primas e conseqüentemente do custo final.

Segundo Jonh (2000), as razões que motivam alguns países em realizar o aproveitamento de resíduos, em geral, são: esgotamento das matérias-primas não renováveis, redução do consumo de energia, menores emissões de poluentes, redução de custos, melhoria na saúde e segurança da população.

A reciclagem de resíduos é uma das maneiras de diversificar a oferta de matéria-prima para a utilização como materiais de construção, viabilizando reduções de preço. Assim, a reciclagem de resíduos como entulho, resíduos agrícolas, resíduos industriais, resíduos de mineração, entre outros, contribuem para a preservação ambiental, sendo esta a questão mais preocupante (Souza, 2007).

Neste trabalho pretende-se estudar três tipos de resíduos para se verificar a viabilidade de seu uso como incorporação em massa cerâmica: cinza da casca de arroz (CCA), lodo de estação de tratamento de água (ETA) e cinza de lenha.

Entre as diversas técnicas de análises de composições e planejamentos experimentais, o uso do delineamento de misturas merece destaque, já que muitos materiais são formados pela mistura de vários componentes e as propriedades do produto manufaturado dependem das proporções dos componentes na formulação. Este tipo de ferramenta tem sido utilizada em inúmeros processos industriais para o desenvolvimento e otimização de produtos. O delineamento de misturas é utilizado neste trabalho para o estudo de composições de argilas e resíduos visando sua aplicação para a fabricação de produtos cerâmicos tais como blocos e pisos.

## **1.2 – ORIGINALIDADE DO TRABALHO**

Vários trabalhos já foram desenvolvidos visando à melhoria das propriedades de produtos cerâmicos com a incorporação de resíduos, mas até o momento, não existe nenhum trabalho científico voltado para a determinação dos teores adequados de argilas e dos três tipos de resíduos para a formulação de composições que podem ser utilizadas pelas indústrias cerâmicas. Com isso, cita-se como originalidade deste trabalho:

- A técnica de planejamento experimental como ferramenta para o estudo de três resíduos (CCA, lodo de ETA e CL) incorporados à massa cerâmica e a identificação da composição ótima pelas formulações realizadas com os mesmos;

- As composições que foram formuladas com a incorporação de um tipo de argila e dois resíduos simultaneamente para se observar as propriedades físico-mecânicas e mineralógica.

Este trabalho, inédito e inovador, procura desenvolver em escala de laboratório um estudo de composições de argilas utilizadas por indústrias cerâmicas do Distrito Federal e da Paraíba com a incorporação de três tipos de resíduos para a melhoria das propriedades de produtos cerâmicos.

### **1.3 – OBJETIVO DO TRABALHO**

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a potencialidade de composições de argilas com a incorporação de resíduos de cinza da casca de arroz, lodo de ETA e cinza de lenha a partir do uso da técnica de planejamento experimental para a sua aplicação na fabricação de blocos e revestimentos cerâmicos.

Como objetivos específicos podem ser citados:

1.3.1 Caracterizar ambientalmente os resíduos utilizados neste trabalho de acordo com as normas da ABNT;

1.3.2 Caracterizar física e mineralogicamente as argilas e os resíduos de cinza de casca de arroz, lodo de ETA e cinza de lenha da região em estudo (Distrito Federal e Paraíba) que podem ser incorporados em massa cerâmica para a fabricação de blocos e revestimentos cerâmicos;

1.3.3 Formular composições com as argilas e os resíduos por meio da metodologia de delineamento de misturas;

- 1.3.4 Estudar a absorção de água, o módulo de ruptura à flexão e a retração de queima das composições preparadas com as argilas e os resíduos citados neste trabalho por meio da metodologia de superfície de resposta;
- 1.3.5 Selecionar composições promissoras e realizar a caracterização tecnológica com a utilização dos resíduos definidos neste trabalho e identificar a composição ótima da mistura.

## **1.4 – ESTRUTURA DA TESE**

Este trabalho está estruturado em seis seções, sendo que a primeira é referente à introdução, que tem um caráter geral de apresentação do trabalho, do objeto de estudo, e dos resíduos de CCA, lodo de ETA e cinza de lenha, seguido da sua importância e dos seus objetivos.

A Seção 2 versa sobre os principais assuntos pertinentes ao meio ambiente e os resíduos que foram utilizados neste trabalho (CCA, lodo da ETA e cinza da lenha). É apresentada também nesta seção as principais influências destes resíduos e das tecnologias empregadas para o seu aproveitamento.

A Seção 3 é referente à microestrutura dos materiais cerâmicos e à indústria cerâmica, onde primeiramente é apresentada uma introdução sobre a matéria-prima básica desta indústria, a argila, bem como as estruturas cristalinas. Por fim, trata-se das características e propriedades das argilas utilizadas para os produtos cerâmicos

A Seção 4 aborda o planejamento e a otimização de experimentos utilizados neste trabalho.

A Seção 5 apresenta os materiais e métodos utilizados neste trabalho.

A Seção 6 contém os resultados finais obtidos no programa experimental e as discussões destes resultados.

As conclusões acerca dos resultados alcançados são apresentadas na Seção 6, bem como são apontadas sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos similares ao conteúdo desta tese.

E por fim, são apresentadas sequencialmente, as referências bibliográficas e os apêndices.

## **2 – OS RESÍDUOS DE CINZA DE CASCA DE ARROZ, CINZA DE LENHA E LODO DE ETA**

Neste capítulo são apresentados alguns aspectos gerais e a geração dos resíduos de cinza de casca de arroz, lodo de ETA e cinza de lenha, além de comentários sobre algumas legislações específicas sobre resíduos.

### **2.1 – INTRODUÇÃO**

A comunidade internacional vem se organizando no sentido de reavaliar e reduzir o uso dos recursos naturais, sensivelmente limitados, e as emissões de gases e resíduos tóxicos e não tóxicos. Para tal, são estudadas principalmente a partir do início dos anos 70, as iniciativas para regulamentar as relações das atividades humanas com o meio-ambiente (Tavares, 2006).

Os resíduos gerados nas atividades da construção civil frequentemente atingem volumes expressivos e não recebem solução adequada, impactando o ambiente urbano e gerando local propício à proliferação de vetores de doenças, tornando críticos os problemas de saneamento nas áreas urbanas.

Além da indústria da construção civil, as demais atividades industriais não constituem exceção, gerando quantidades apreciáveis de resíduos que, via de regra, são simplesmente descartados como lixo, constituindo problemas para sua gestão futura. Além do aspecto da geração propriamente dita, há que se considerar que as atividades fabris consomem recursos naturais (renováveis e não renováveis), incorporando gastos energéticos significativos.

Segundo a resolução do CONAMA (01/1986), o impacto ambiental pode ser definido como sendo qualquer alteração das características físicas, químicas e/ou naturais do meio ambiente, causadas por qualquer forma de matéria ou energia resultante de atividades humanas, que direta ou indiretamente afetam:

- a) a saúde, segurança e o bem estar;

- b) atividades sociais e econômicas;
- c) o conjunto de plantas e animais de uma determinada área;
- d) as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- e) a qualidade dos recursos naturais.

De acordo com Menezes et al. (2002), os depósitos de resíduos não podem mais ser vistos como locais puros e de simples armazenamento, nem como a solução mais adequada. A eliminação de resíduos, embasada em estudos capazes de detectar as potencialidades e viabilizar a seleção preliminar das sobras, pode resultar em matérias-primas alternativas para a obtenção de produtos com características diferenciadas.

Alguns conceitos como reciclagem, reutilização e recuperação são de grande importância e visam a um melhor enquadramento quanto ao aproveitamento de resíduos como materiais de construção.

Hendriks (2000) comenta que a reciclagem diz respeito ao ciclo completo de “novo-velho-novo” e implica numa série de operações: coleta, desagregação, seguidas da classificação, tratamento e subsequente retorno ao produtor original, que novamente a transforma em uma “nova”, mas secundária, matéria-prima. Ocasionalmente, ela é imediatamente transformada em um produto secundário semi-acabado.

Os três principais tipos de reciclagem utilizados para os polímeros termoplásticos são: a química, a energética e a mecânica. Um exemplo de reciclagem química é o processo de pirólise por leito fluidizado: neste ocorre a conversão dos componentes dos resíduos poliméricos em óleos combustíveis, mas tal processo exige grandes investimentos em tecnologias importadas significando ainda um alto custo por tonelada reciclada (Ehrig, 1992).

Já a reciclagem energética consiste no reaproveitamento proporcionado pela combustão dos termoplásticos em incineradores próprios para este tipo de material. Este processo é colocado como última opção no reaproveitamento de qualquer tipo de material, devido aos altos custos, sem contar com o desperdício do material que é eliminado ao invés de destinado a outras aplicações.

A principal forma de reciclagem de termoplásticos é a mecânica, por consistir em um processo com etapas simples, tornando assim o custo final relativamente baixo e apresentando altos índices de aproveitamento do material processado.

Segundo Calderoni, (1998), dentre as estratégias de ação, o tratamento através da valorização não energética (reciclagem, reemprego e reutilização) vem sendo muito utilizado nos últimos anos devido à vantagens como:

- Organização espacial
- Preservação e uso racional de recursos naturais
- Conservação e economia de energia
- Geração de empregos
- Desenvolvimento de produtos
- Saneamento básico e proteção da saúde pública
- Geração de renda
- Redução de desperdícios

Graedel & Allenby (1996) afirmam que dentre os possíveis tratamentos de um resíduo, a reciclagem é um dos principais fatores considerados, podendo segundo a natureza do mesmo, fazer parte de um ciclo fechado ou aberto.

Na Figura 2.1 é possível observar um ciclo fechado, onde o material rejeitado será reprocessado, e ao final possuirá as mesmas características físicas e morfológicas do material original. Na Figura 2.2, está representado o ciclo aberto, onde o material rejeitado é processado, porém ao final possuirá características diferentes do produto original (surge um produto novo).

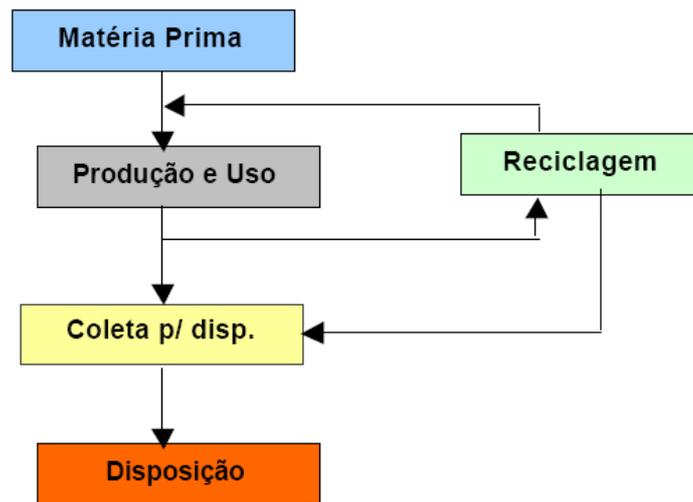


Figura 2.1 – Ciclo fechado de reciclagem de materiais

Fonte: Antunes, 2001

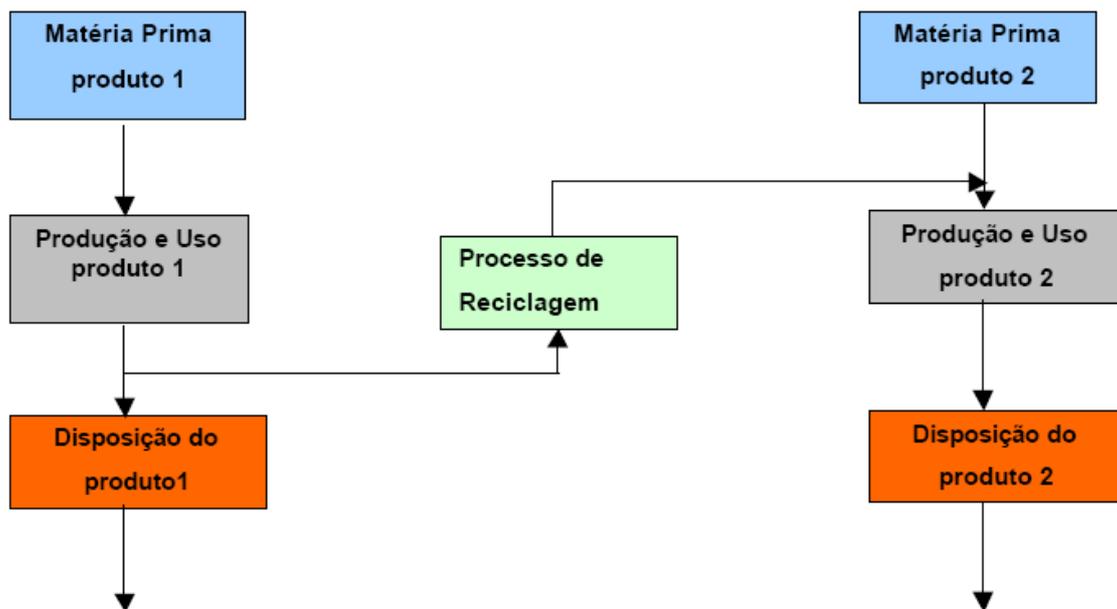


Figura 2.2 – Ciclo aberto de reciclagem de materiais

Fonte: Antunes, 2001

De acordo com Hendriks (2000) e Rocha e Cheriaf (2003), a recuperação de matérias-primas é muito semelhante à coleta em geral e ocasionalmente inclui processamento. O termo recuperação é também utilizado para se referir somente à coleta de materiais, sem tratamento. Exemplo: recuperação de PETs, papéis, do sistema de coleta formal, ou ainda de lodos de tratamento de efluentes destinados à eliminação em aterros controlados.

A reutilização é definida por Hendriks (2000) estritamente, como usar um material novamente e não implica em nenhum caso em tratamentos posteriores. A reutilização, portanto, pode incluir:

- o mesmo propósito do material original;
- uma proposta alternativa e diferente da original.

Rocha e Cheriaf (2003) afirmam que valorização é dar um valor comercial a um determinado resíduo e valorização energética implica na utilização do poder calorífico dos resíduos, como por exemplo, a casca de arroz usada no processo de beneficiamento e secagem do arroz, as madeiras destinadas à queima em caldeiras e a incorporação de lodo em matrizes cerâmicas para redução dos tempos de queima.

O reemprego é o novo emprego de um resíduo para uso análogo ao seu primeiro ciclo de produção. Exemplo: incorporação de argamassas ainda no estado fresco, reprocessadas, para produção de uma nova argamassa, uso da água de lavagem de caminhões betoneiras na produção de concretos (Rocha e Cheriaf, 2003).

A reciclagem e reutilização de resíduos provenientes de diferentes processos industriais como novas matérias-primas cerâmicas tem sido objeto de pesquisas em diversas instituições e têm-se buscado soluções que consideram vários aspectos: a proximidade com a fonte geradora de resíduos, o tipo e a quantidade de resíduo disponível, a tecnologia e tipos de produtos que poderão absorvê-lo, o custo de descarte e tratamento e, finalmente, o impacto econômico e ambiental da reciclagem do resíduo.

Ingunza et al. (2006) afirmam que as aplicações mais adequadas para a reciclagem são aquelas que além de minimizar a necessidade de separação, classificação e transformação industrial do resíduo, minimizam o risco de lixiviação e volatilização de elementos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde e resultem em um produto com vantagem econômica ou valorização ambiental em relação aos já existentes e disponíveis no mercado.

Visando a uma avaliação do potencial de aproveitamento de resíduos, Cheriaf et al. (1997) estabeleceram a necessidade de identificação dos parâmetros estruturais, geométricos e ambientais dos resíduos, conforme esquematizado na Tabela 2.1.

No Brasil existem pesquisas sobre o assunto, mas a reciclagem de resíduos ainda não exerce um papel significativo na indústria de construção civil. Entre as razões, destaca-se a falta de integração da pesquisa brasileira com a internacional, a falta de incentivo às indústrias e a falta de tecnologia adequada (Menezes et al, 2002).

Tabela 2.1 – Parâmetros a serem identificados nos resíduos

Fonte: Cheriaf et al, 1997

Caracterização	
Parâmetros estruturais	Parâmetros geométricos
Difratometria de raios X Análises termogravimétricas Análise química Espectrometria infra-vermelho	Granulometria Densidade Superfície específica Microscopia eletrônica de varredura
Outros parâmetros	Parâmetros ambientais
Reologia Matéria orgânica Consistência Pureza	Lixiviação de resíduos - NBR 10005 Solubilização de resíduos - NBR 10006 Testes adaptados de materiais

O desenvolvimento tecnológico de processos associados à reciclagem de resíduos industriais passa a ter uma enorme relevância. O aumento no descarte de resíduos sólidos, bem como os problemas advindos da exaustão de matérias-primas naturais, vem impulsionando os estudos sobre o aproveitamento desses resíduos como novos materiais, reduzindo o seu impacto ambiental e viabilizando a redução de custos industriais e a criação de novos empregos (Rocha e Cheriaf, 2003).

### 2.1.1 – Legislação aplicável

A ABNT NBR 10.004 (2004) define resíduos sólidos como sendo os resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resulta de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Esta norma classifica os resíduos sólidos da seguinte forma.

### **a) Resíduos Classe I**

*i.* perigosos – resíduos classe I – são aqueles que apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: toxicidade, flamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade e radioatividade.

### **b) Resíduos Classe II**

*ii.* não inertes – resíduos classe II A – são aqueles resíduos que podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;

*iii.* inertes – resíduos classe II B – quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, (segundo a ABNT NBR 10007, 2004), e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, acentuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor. Como exemplos destes materiais têm-se rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

A lei 9.605 – Lei de Crimes Ambientais (Brasil, 1998) dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Por essa lei, é definido como crime ambiental o ato de causar poluição em níveis tais que possam resultar em danos à saúde humana devido ao lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos em desacordo com as exigências estabelecidas em leis e regulamentos.

A resolução nº 357 (CONAMA, 2005) dispõe, entre outros assuntos, sobre os padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água. Dentre as várias condicionantes apresentadas, tem-se que o limite para o parâmetro “sólidos sedimentáveis” é de apenas 1 mL/L, sendo que para o lançamento em lagos e lagoas os materiais sedimentáveis devem estar virtualmente ausentes.

A legislação brasileira ambiental (lei N.º 6938, de 31 de agosto de 1981), que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e de outras providências, tornou mais rigorosa a destinação de resíduos das mais variadas origens.

A resolução do CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente: Resolução 307, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Entrou em vigor em 02/01/03, e, concedeu prazo até janeiro de 2005, para que os geradores incluíssem um plano de gestão em seus projetos de obras a serem aprovados pelos órgãos competentes.

Outros importantes instrumentos legais brasileiros, sobre meio ambiente, encontram-se dispostos na Constituição Federal (art. 225, § 1º, V e § 3º), em leis especiais, como a Lei de Zoneamento Industrial (Lei 6.803/80, art. 9º), Lei de Agrotóxicos (Lei 7.802/89), Lei de Crimes Ambientais e Infrações Administrativas Contra o Meio Ambiente (lei 9.605/98), Decreto Presidencial 875/93 (sobre a Aplicação da Convenção da Basiléia de Movimentos Transfronteiriços de Transportes de Resíduos Perigosos e seu Depósito) e em normas regulamentares do executivo, em especial o Decreto Federal 88.821/83 (Regulamento de Transportes de Produtos Perigosos), Decreto Federal 96.044/88 (Transporte de Substâncias Perigosas), Resolução CONAMA 6/88 (Licenciamento de Resíduos Industriais Perigosos), Resolução CONAMA 5/93 (Destinação Final de Resíduos Sólidos), Resolução CONAMA 3794 (sobre a Convenção da Basiléia) e Resolução CONAMA 237/97 (Licenciamento Ambiental) e as Normas Regulamentadoras (NRs) do Ministério do Trabalho, criadas pela Lei 6.514/77 e baixadas por Portaria dispendo sobre Segurança e Higiene do Meio Ambiente do Trabalho (destaque para as NRs: 4, 5, 6, 7, 9, 11, 15, 16 e 18).

## **2.2 – A CINZA DA CASCA DE ARROZ**

### **2.2.1 – Generalidades**

Segundo a Organização para a Alimentação e a Agricultura das Nações Unidas – FAO (2008), o arroz é o alimento básico de mais da metade da população mundial, provendo 20% da energia fornecida pela dieta alimentar no mundo, enquanto o trigo provê 19% e o milho 5%.

Na Tabela 2.2 é apresentado, por região e estado, a produção anual de arroz, segundo dados do CONAB (2009), podendo ser observado que a Região Sul encontra-se em primeiro lugar, na produção do cereal, na avaliação da safra 2008/2009.

Tabela 2.2 – Produção anual de arroz por região e estado  
Fonte: CONAB, 2009

REGIÃO /UF	ÁREA (em mil ha)					PRODUTIVIDADE (em kg/ha)			PRODUÇÃO (em mil t)				
	Safra 07/08 (a)	Safra 07/08 (b)		VAR. %		Safra 07/08	Safra 08/09	VAR.%	Safra 07/08 (f)	Safra 07/08 (b)		VAR. %	
		Lim Inf (b)	Lim Sup (c)	(b/a)	(c/a)	(d)	(e)	(e/d)	(f)	Lim Inf (g)	Lim Sup (h)	(g/f)	(h/f)
<b>NO</b>	<b>434,8</b>	<b>442,7</b>	<b>450,5</b>	<b>1,8</b>	<b>3,6</b>	<b>2.351</b>	<b>2.370</b>	<b>0,8</b>	<b>1.022,5</b>	<b>1.048,3</b>	<b>1.068,6</b>	<b>2,5</b>	<b>4,5</b>
RR	22,2	22,2	22,2	-	-	5.667	5.323	(6,1)	125,8	118,2	118,2	(6,0)	(6,0)
RO	71,4	71,4	71,4	-	-	2.025	2.080	2,7	144,6	148,5	148,5	2,7	2,7
AC	12,7	12,7	12,7	-	-	1.596	1.550	(2,9)	20,3	19,7	19,7	(3,0)	(3,0)
AM	4,8	4,8	4,8	-	-	1.900	1.820	(4,2)	9,1	8,7	8,7	(4,4)	(4,4)
AP	3,3	3,3	3,3	-	-	1.090	1.100	0,9	3,6	3,6	3,6	-	-
PA	163,3	163,3	163,3	-	-	1.821	1.963	7,8	297,4	320,6	320,6	7,8	7,8
TO	157,1	165,0	172,8	5,0	10,0	2.684	2.600	(3,1)	421,7	429,0	449,3	1,7	6,5
<b>NE</b>	<b>709,3</b>	<b>709,3</b>	<b>709,3</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1.659</b>	<b>1.599</b>	<b>(3,6)</b>	<b>1.176,8</b>	<b>1.134,4</b>	<b>1.134,4</b>	<b>(3,6)</b>	<b>(3,6)</b>
MA	477,6	477,6	477,6	-	-	1.465	1.420	(3,1)	699,7	678,2	678,2	(3,1)	(3,1)
PI	143,3	143,3	143,3	-	-	1.582	1.500	(5,2)	226,7	215,0	215,0	(5,2)	(5,2)
CE	33,6	33,6	33,6	-	-	2.976	2.730	(8,3)	100,0	91,7	91,7	(8,3)	(8,3)
RN	2,2	2,2	2,2	-	-	2.455	2.455	-	5,4	5,4	5,4	-	-
PB	7,3	7,3	7,3	-	-	1.277	1.330	4,2	9,3	9,7	9,7	4,3	4,3
PE	5,0	5,0	5,0	-	-	5.490	5.300	(3,5)	27,3	26,5	26,5	(2,9)	(2,9)
AL	3,1	3,1	3,1	-	-	4.325	4.250	(1,7)	13,4	13,2	13,2	(1,5)	(1,5)
SE	11,5	11,5	11,5	-	-	4.678	4.440	(5,1)	53,8	51,1	51,1	(5,0)	(5,0)
BA	25,7	25,7	25,7	-	-	1.602	1.695	5,8	41,2	43,6	43,6	5,8	5,8
<b>CO</b>	<b>368,8</b>	<b>349,6</b>	<b>356,3</b>	<b>(5,2)</b>	<b>(3,4)</b>	<b>2.891</b>	<b>2.914</b>	<b>0,8</b>	<b>1.066,2</b>	<b>1.019,4</b>	<b>1.037,4</b>	<b>(4,4)</b>	<b>(2,7)</b>
MT	238,9	215,0	219,8	(10,0)	(8,0)	2.850	2.840	(0,4)	680,9	610,6	624,2	(10,3)	(8,3)
MS	35,4	35,4	35,4	-	-	5.319	5.160	(3,0)	188,3	182,7	182,7	(3,0)	(3,0)
GO	94,4	99,1	101,0	5,0	7,0	2.086	2.280	9,3	196,9	225,9	230,3	14,7	17,0
DF	0,1	0,1	0,1	-	-	1.300	2.085	60,4	0,1	0,2	0,2	100,0	100,0
<b>SE</b>	<b>94,4</b>	<b>87,0</b>	<b>88,5</b>	<b>(7,8)</b>	<b>(6,2)</b>	<b>2.534</b>	<b>2.625</b>	<b>3,6</b>	<b>239,2</b>	<b>228,5</b>	<b>232,2</b>	<b>(4,5)</b>	<b>(2,3)</b>
MG	67,5	60,1	61,4	(11,0)	(9,0)	2.126	2.260	6,3	143,5	135,8	138,8	(5,4)	(3,3)
ES	2,0	2,0	2,0	-	-	2.926	2.917	(0,3)	5,8	5,8	5,8	-	-
RJ	2,3	2,3	2,3	-	-	3.437	3.385	(1,5)	8,0	7,8	7,8	(2,5)	(2,5)
SP	22,6	22,6	22,8	-	1,0	3.626	3.500	(3,5)	81,9	79,1	79,8	(3,4)	(2,6)
<b>S</b>	<b>1.266,9</b>	<b>1.275,2</b>	<b>1.299,4</b>	<b>0,7</b>	<b>2,6</b>	<b>6.751</b>	<b>6.757</b>	<b>0,1</b>	<b>8.552,7</b>	<b>8.617,0</b>	<b>8.778,5</b>	<b>0,8</b>	<b>2,6</b>
PR	47,2	44,8	46,2	(5,0)	(2,0)	3.666	3.700	0,9	172,9	165,8	170,9	(4,1)	(1,2)
SC	153,1	153,1	154,6	-	1,0	6.650	7.000	5,3	1.018,1	1.071,7	1.082,2	5,3	6,3
RS	1.066,6	1.077,3	1.098,6	1,0	3,0	6.902	6.850	(0,8)	7.361,7	7.379,5	7.525,4	0,2	0,2
<b>NO/NE</b>	<b>1.144,1</b>	<b>1.152,0</b>	<b>1.159,8</b>	<b>0,7</b>	<b>1,4</b>	<b>1.922</b>	<b>1.897</b>	<b>(1,3)</b>	<b>2.199,3</b>	<b>2.182,7</b>	<b>2.203,0</b>	<b>(0,8)</b>	<b>(0,2)</b>
<b>CO/SE/S</b>	<b>1.730,1</b>	<b>1.711,8</b>	<b>1.744,2</b>	<b>(1,1)</b>	<b>0,8</b>	<b>5.698</b>	<b>5.762</b>	<b>1,1</b>	<b>9.858,1</b>	<b>9.864,9</b>	<b>10.048,1</b>	<b>0,1</b>	<b>1,9</b>
<b>BRASIL</b>	<b>2.874,1</b>	<b>2.863,8</b>	<b>2.904,0</b>	<b>(0,4)</b>	<b>1,0</b>	<b>4.195</b>	<b>4.213</b>	<b>0,4</b>	<b>12.057,4</b>	<b>12.047,6</b>	<b>12.251,1</b>	<b>(0,1)</b>	<b>1,6</b>

O arroz é um dos alimentos mais consumidos no Brasil e em muitos países pela população, impondo o plantio deste cereal como uma das principais culturas agrícolas. A safra de 2008, segundo dados do IBGE (2009), foi de aproximadamente 12.100.000 toneladas de arroz em casca, sendo que, somente no estado do Rio Grande do Sul, a produção foi estimada em aproximadamente 7.000.000 toneladas, perfazendo, aproximadamente, 59% da produção nacional (CONAB, 2009), onde o beneficiamento do produto gera cerca de 1.400.000 ton/ano de resíduo (casca de arroz).

Com uma produção superior a treze milhões de toneladas de arroz, o Brasil ocupa o 9º lugar na lista dos produtores mundiais, segundo dados do IBGE (2008). Estima-se, atualmente, um crescimento na produção mundial de cem milhões de toneladas de arroz a cada ano, o que gera um volume considerável de casca, cerca de 20% da produção (Prudêncio Júnior et al, 2002). A produção mundial de arroz em casca para a safra 2004 foi de 608 milhões de toneladas (FAO, 2006).

Essa elevada produção anual aponta o Brasil como destaque mundial na produção de arroz, tornando-o um dos principais produtores do grão, como é apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Principais produtores mundiais de arroz.  
Fonte: FAO, 2005

Ranking	País	Produção (t)
1º	China	182.055.140
2º	Índia	137.620.000
3º	Indonésia	53.984.590
4º	Bangladesh	39.795.620
5º	Vietnã	35.790.800
6º	Tailândia	29.427.540
7º	União de Mianmar	25.364.000
8º	Filipinas	14.603.010
9º	Brasil	13.192.860
10º	Japão	11.342.000

A casca de arroz, de acordo com normas da ABNT NBR 10.004, é enquadrada como um resíduo de classe II, ou seja, não inerte e não perigoso à saúde humana e ao meio ambiente. O problema é que, quando incinerada em ambiente fechado (caldeiras e fornos, por exemplo), resulta em cinzas que são altamente poluentes, pois esta queima libera CO e CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, prejudiciais à saúde do homem, podendo contribuir também para o efeito estufa. Outro destino comum da casca é o descarte no meio ambiente, destacando-se as lavouras e fundos de rios (Visconte, 2003).

A casca de arroz é um subproduto agrícola energético, pois 1000 kg de arroz produz cerca de 200 kg de casca, cuja combustão gera 14MJ/kg de energia e 40 kg de cinza (Just, 2000).

### **2.2.2 – A casca de arroz e a cinza da casca de arroz**

A casca de arroz é constituída de quatro camadas fibrosas, esponjosas, ou celulares, que são silicosas, com alto teor de sílica, composta de, aproximadamente, 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra (Mehta, 1992). A composição química da casca de arroz depende do tipo de solo, tipo e percentual de fertilizante e tipo de arroz. Segundo Dafico (2001) os elementos mais comuns presentes na casca de arroz são: silício, sódio, potássio, cálcio, cobre, manganês e zinco.

O processo de beneficiamento do arroz produz considerável volume de cascas, que por sua vez quando utilizadas como combustível, gera resíduos (cinza), que requerem cuidados especiais para a sua disposição (adequação dos locais para a deposição e monitoramento).

Na Figura 2.3 apresenta-se um fluxograma para obtenção da cinza de casca de arroz a partir do beneficiamento do arroz e suas diversas aplicações.

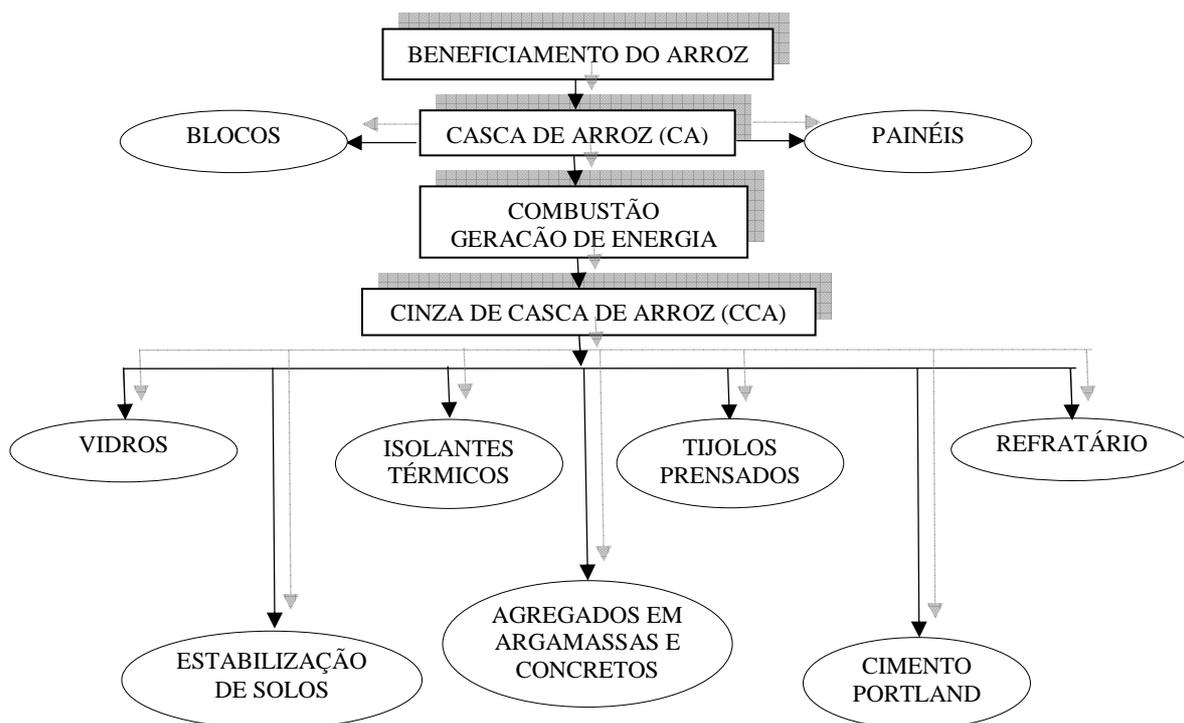


Figura 2.3 – Fluxograma de aplicação de CCA a partir do beneficiamento do arroz  
 Fonte: Malhotra e Mehta, 1996

A queima da casca de arroz produz uma quantidade significativa de cinzas. Na Tabela 2.4 são apresentados os percentuais de alguns cereais. Observa-se que nenhum outro resíduo da agricultura produz tanta quantidade de cinza quando queimado.

Tabela 2.4 – Porcentagem de cinza em peso de alguns cereais  
 Fonte: Mehta, 1992

Cereal	Parte da planta	Cinza (% em peso)
Milho	Folha	12
Arroz	Casca	20
Arroz	Palha	14
Cana-de-açúcar	Bagaço	15
Girassol	Folhas e talo	11
Trigo	Folhas	10

De acordo com Prudêncio Júnior et al. (2003), depois de queimada a cinza da casca de arroz é composta basicamente por dióxido de silício, ou sílica ( $\text{SiO}_2$ ), em proporções que giram em torno de 90%. Outros compostos como  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnO}$  e  $\text{Cl}$  podem ser encontrados em sua composição, porém em quantidades muito pequenas.

De acordo com Tiboni (2007), atualmente, as indústrias de beneficiamento de arroz são ainda as principais consumidoras da casca do cereal como combustível para a secagem e parboilização do arroz. Mudanças ocorridas ao longo do tempo no processo de beneficiamento do arroz obrigaram as usinas a gerarem energia para a secagem do produto. Este processo gera um volume demasiado de cinzas sem valor comercial que, normalmente, acabam sendo lançadas nos cursos de água ou em terrenos baldios, ocasionando poluição e contaminação de mananciais e da atmosfera conforme apresentado nas Figuras 2.4 e 2.5.

O reaproveitamento de um subproduto industrial, que muitas vezes serve apenas como mais um poluente industrial, também é um aspecto de grande importância principalmente nos dias de hoje em que a busca por um desenvolvimento industrial sustentável é o grande objetivo e desafio da ciência. (Duart, 2008)



Figura 2.4 – Depósito de cinza da casca de arroz ao longo de estrada vicinal em Santa Catarina

Fonte: Santos, 1997



Figura 2.5 – Vista de um aterro com cinza de casca de arroz residual  
Fonte: Pouey, 2006

A cinza de arroz contém alto teor de sílica e isto a torna um resíduo valorizado. No entanto, essa cinza só terá alto valor econômico se tiver alta qualidade, que é mensurada pela sua alta superfície específica, tamanho e pureza de partícula. Conseqüentemente, seria um grande desperdício de matéria-prima jogá-la fora, já que pode ser usada como alternativa tecnológica em vários ramos industriais, conforme exposto por Hoffmann et al. (1996), tais como:

- Pré-concentração de ouro;
- Obtenção de diferentes tipos de silicato;
- Produção de carbeto de silício (SiC);
- Sílica pura;
- Carga em compostos de borracha natural;
- Produção de cimento e uso em concreto;
- Produção de mulita;
- Suporte em catalisadores de níquel;
- Zeólitas.

Segundo Pouey (2006), somente 25% das 26 mil toneladas de cinza produzidas anualmente na região de Pelotas - RS é incorporada a produtos fabricados na indústria, sendo o restante descartado no ambiente.

A casca de arroz é freqüentemente considerada um problema ambiental. Entretanto, este material pode ser usado como adições em concretos e argamassas, podendo ser empregados na produção de peças para painéis de alvenaria, assim como, incorporados à massa cerâmica para a fabricação de blocos cerâmicos e revestimentos.

Martinez (2003) mostrou que painéis de alvenaria com argamassa armada, feitos com adição de casca de arroz, empregados para paredes de vedação, têm o mesmo desempenho de painéis tradicionais de blocos cerâmicos. Neste caso, além do benefício da redução de custo pela utilização de um rejeito reciclado, tem-se o ganho de qualidade de construções industrializadas. O produto produzido em escala industrial tem dimensões estáveis e regulares e superfícies lisas. As faces lisas podem ser pintadas após a aplicação de uma camada de gesso ou massa corrida para garantir um acabamento de boa qualidade.

Nesse sentido o reaproveitamento de resíduos surge como uma alternativa, tanto do ponto de vista econômico como ambiental, ao descarte do mesmo no meio ambiente e a indústria da construção civil tem sido a melhor opção para a reutilização desses resíduos. Assim, a utilização de resíduos pela indústria cerâmica vermelha se adéqua a essa tendência, possibilitando ainda agregar valor ao rejeito, diminuir a quantidade de matéria-prima a ser utilizada e minimizar ou evitar que rejeitos sejam descartados em aterros ou rios.

## **2.3 – O LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

### **2.3.1 – Aspectos gerais**

Nos centros urbanos, o abastecimento de água torna-se cada vez mais centrado na qualidade do produto a ser distribuído à população. Em contrapartida, a qualidade da água bruta está piorando e exige uma maior concentração de produtos químicos aplicados no seu tratamento. Como consequência, há um significativo aumento nos resíduos ou lodo, provenientes das Estações de Tratamento de Água (ETA), os quais são gerados principalmente nos decantadores (Portella, 2003). O volume gerado deste lodo é muito grande.

O processo de potabilização da água, tradicionalmente utilizado no Brasil, emprega um conjunto de operações, que em geral envolve aplicação de produtos químicos e processos físicos, que acaba gerando resíduos constituídos basicamente de lodos de tanques de sedimentação ou flotação, e águas de lavagem de filtros.

Os lodos gerados nas estações de tratamento de água e de esgotos até pouco tempo eram indiscriminadamente lançados em rios causando a sua degradação, mas legislações cada vez mais restritivas, associadas aos altos custos de disposição em aterros (sanitários ou exclusivos) e à disponibilidade cada vez menor de áreas para a implantação destes, têm levado pesquisadores e técnicos à busca de soluções mais econômicas e ambientalmente sustentáveis para o tratamento e disposição final dos lodos.

Segundo Morita et al. (2002), os custos relacionados ao acondicionamento de resíduos em aterros são altos e o uso agrícola, embora utilizado em muitos locais, ainda sofre restrições em relação aos tipos de cultura que podem beneficiar-se da sua utilização, já que existe a possibilidade de sua contaminação por metais pesados.

Em indústrias, geralmente, procede-se ao tratamento de efluentes satisfatoriamente, porém sem perspectivas quanto ao uso e utilização do lodo inevitavelmente gerado. A disposição mais comum dos lodos removido de decantadores e adensadores é o descarte em aterros, embora sendo uma solução de alto risco, já que com o acúmulo, as chuvas podem transportá-lo para os rios e atingir o lençol freático. É uma solução de baixo custo, mas implica em disponibilidade de grandes áreas, longe de centros habitacionais.

Outras alternativas para o armazenamento ou disposição dos lodos são os filtros prensa ou outros equipamentos para a desidratação reduzindo sensivelmente o seu volume e obtendo-se uma torta com concentrações de sólidos de 60 a 70%, para os seguintes fins: adubação, incineração, aterros sanitários de lixo urbano, compostagem com lixo urbano, lançamento aos rios ou ao mar. (Tsutiya e Hirata 2001 e Hammer et al. 1996)

A utilização dos lodos de estações de tratamento de água como matéria-prima na indústria cerâmica apresenta uma série de vantagens em relação a outros tipos de uso, pois as operações inerentes a esta (fornos com altas temperaturas) fazem com que os riscos sanitários se reduzam ao mínimo.

De acordo com Araújo et al. (2006), os benefícios advindos da utilização do lodo na indústria cerâmica são vários, dentre os quais pode-se destacar:

- Aumento da vida útil da jazida e diminuição com os custos com recomposição de áreas com vegetação nativa;
- Alternativa definitiva para o problema de disposição do resíduo;
- Redução da supressão da vegetação devido à atividade extrativa, pela minimização da emissão de fluoretos e pela redução da poluição aquática causada pelo lançamento de lodo.

Dessa forma, a utilização dos lodos de estações de tratamento de água (ETA) se configura numa solução economicamente viável para aqueles lodos que não apresentam tratamento sanitário adequado para outros tipos de uso.

### **2.3.2 – Lodos gerados em ETAs**

De acordo com Cordeiro (1999), existem cerca de 7.500 ETAs de ciclo completo ou convencional no Brasil, estima-se que são lançados em cursos d'água cerca de 2.000 toneladas/dia de lodo de ETA sem nenhum tratamento.

Esta preocupação com o lodo de ETAs tem gerado muitas pesquisas, no que se refere a sua caracterização, desaguamento e, principalmente, destinação final. Estas pesquisas têm sido geradas, principalmente, pelo questionamento dos órgãos ambientais devido aos riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Esta crescente preocupação tem gerado regulamentações que restringem e, até mesmo, proíbem o lançamento deste lodo de ETA em rios.

Como uma solução viável, o lodo de ETAs poderia ser incorporado à massa cerâmica como componente não-plástico colaborando na resolução do problema ambiental gerado pelos lodos, pois a indústria consome elevadas quantidades de matéria-prima. Além disso, a incorporação do lodo traria redução dos custos com matéria-prima dos produtos cerâmicos, já que os lodos poderiam ser obtidos com custo negativo ou muito baixo.

Estuda-se o potencial do lodo proveniente de uma unidade de tratamento de água como constituinte de massas cerâmicas visando:

- diminuição do impacto ambiental
- economia de argila
- menor custo do produto acabado

Para Barros (1995), o sistema de abastecimento de água é a solução coletiva para o fornecimento de água de uma comunidade. São seguintes as unidades que compõem este sistema:

**Manancial** – fonte de onde se retira a água;

**Captação** – conjunto de equipamentos e instalações utilizados para a tomada de água do manancial;

**Adução** – transporte da água do manancial ou da água tratada;

**Tratamento** – melhoria das características qualitativas da água, do ponto de vista físico, químico, bacteriológico e organoléptico, a fim de que se torne própria para consumo. É feito na chamada ETA (Estação de Tratamento de Água);

**Reservação** – visa atender a diversos propósitos, como por exemplo a variação de consumo e a manutenção da pressão mínima na rede;

**Distribuição** – condução da água para os edifícios e pontos de consumo, por meio de tubulações instaladas nas vias públicas;

**Elevação ou recalque** – bombeamento cujo objetivo é o de transportar a água a pontos mais distantes ou mais elevados, ou para aumentar a vazão de linhas adutoras.

Na Figura 2.6 apresenta-se de forma simplificada o fluxograma de um sistema de abastecimento de água, com as unidades de funcionamento.

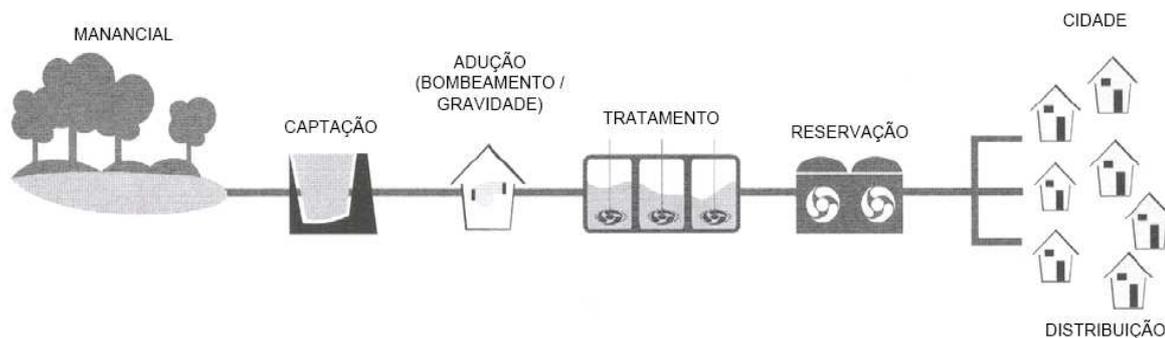


Figura 2.6 – Esquema de um sistema de abastecimento de água  
 Fonte: CAESB, 2009

As etapas de tratamento aplicado em determinada água depende da sua qualidade “*in natura*”. Em face disso, existem unidades de tratamento que utilizam desde uma simples cloração até unidades mais complexas, ou seja, que contemplam todas as etapas do tratamento do tipo convencional descrito a seguir:

**Coagulação / floculação:** processo em que é adicionado à água um produto químico denominado coagulante, o que faz com que as impurezas se aglutinem formando flocos, para serem mais facilmente removidos;

**Decantação:** os flocos aglutinados ficam mais pesados que a água e sedimentam-se no fundo do decantador, por ação da gravidade;

**Filtração:** Nesta etapa, a água passa por várias unidades filtrantes, que são constituídas normalmente de grãos de areia, onde os flocos menores ficam retidos;

A floculação, decantação e filtração removem todas as partículas de impureza deixando a água límpida, mas que ainda não está pronta para ser consumida.

**Desinfecção:** aplicação de compostos de cloro para eliminação de microorganismos nocivos à saúde;

**Fluoretação:** aplicação de compostos de flúor para prevenção da cárie dentária;

**Alcalinização:** correção do pH para evitar problemas de corrosão ao longo das redes de distribuição.

O processo convencional de tratamento de água para fins de abastecimento envolve diversas etapas, onde são gerados resíduos, principalmente nas etapas de sedimentação, flotação e filtração. Outras atividades desenvolvidas em uma estação, como as lavagens em tanques de preparação de produtos químicos e a raspagem da camada superficial em

filtros lentos de areia, também contribuem para a geração de resíduos, da mesma forma que os rejeitos produzidos por unidades de tratamento que utilizam o processo de abrandamento com cal (Guimarães, 2007).

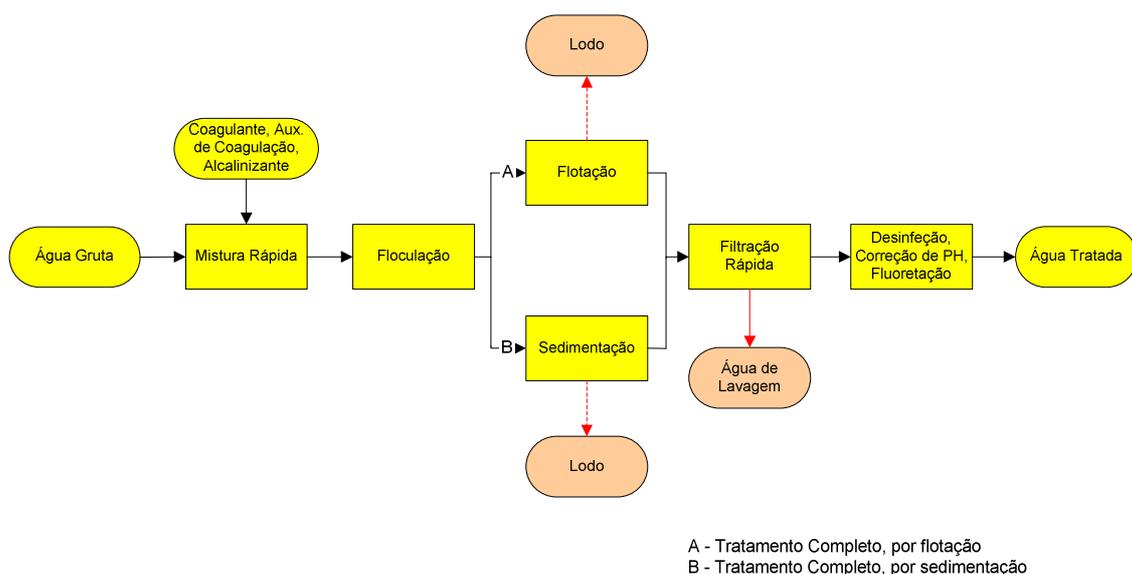
Os fluxogramas de unidades típicas de tratamento de água com coagulação química são apresentados na Figura 2.7, onde são indicadas também as operações responsáveis pela geração dos resíduos de maior relevância.

Em termos volumétricos, a maior quantidade de resíduos é proveniente da lavagem de filtros, mas, em termos mássicos, a maior quantidade de lodo produzido é gerada nas descargas de decantadores ou na remoção da espuma acumulada nas unidades de flotação.

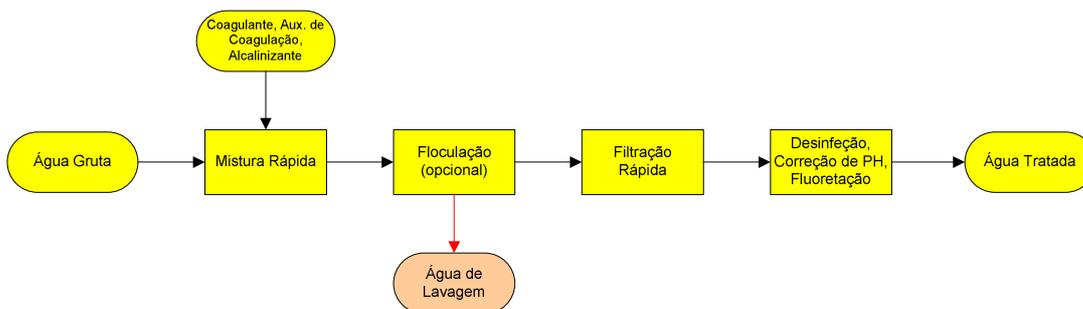
A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que os mesmos possam ser gerenciados adequadamente.

E de acordo com norma citada, em geral, os resíduos de ETA não possuem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade, sendo, portanto, considerados da “Classe II – Não perigosos”. Embora a patogenicidade seja uma característica dos resíduos “Classe I – Perigosos”, segundo a norma os resíduos gerados em estações de tratamento de esgotos não estão sujeitos ao critério de patogenicidade, podendo-se inferir que essa exceção seja estendida também aos resíduos do tratamento de água.

## TRATAMENTO COMPLETO



## FILTRAÇÃO DIRETA



## LEGENDA

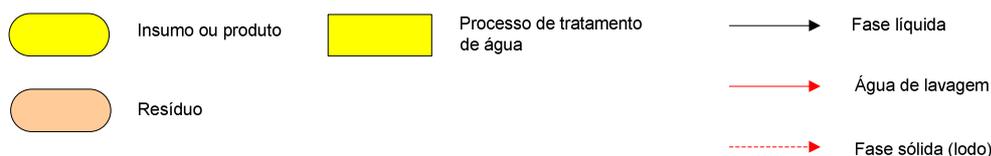


Figura 2.7 – Resíduos gerados em ETAs com tratamento completo e com filtração direta

Fonte: Guimarães, 2007

Em relação a sua sub-classificação, os lodos de decantadores e flotadores, assim como a água de lavagem de filtros, tendem a ser classificados como “Classe IIA – Não inertes”, devido as altas concentrações de alguns metais incorporados em sua estrutura, tais como o alumínio presente nos coagulantes utilizados no tratamento de água. Como exemplo, Di Bernardo (1999), após realizar ensaios de caracterização dos sedimentos da ETA- Descalvado, em São Paulo, verificou que o lodo em questão se tratava da “Classe II A –

Não inertes”, devido às concentrações de alumínio, ferro e manganês presentes no lodo, superiores aos limites da norma para classificação como resíduo sólido inerte. Deve-se limitar, então, o lançamento desses resíduos diretamente nos corpos d’água, devendo-se recorrer a processos adequados de tratamento e disposição final.

Devido à adição de sais de alumínio ou sais de ferro para provocar a coagulação dos resíduos existentes na água bruta, os hidróxidos desses sais passam a ser os principais componentes químicos do lodo e, além disso, partículas orgânicas e inorgânicas. Na ausência de algas e outros materiais orgânicos no manancial, a fração orgânica do lodo torna-se desprezível e o lodo passa a ter características de estabilidade química, sendo composto apenas de matéria inorgânica, tais como areias finas, limos e argilas (Wag, 1996).

A concentração de sólidos determina a consistência dos resíduos gerados na ETA, que apresentam-se como líquido nos pontos de geração até uma consistência similar a argilas utilizadas na produção de cerâmica, na torta obtida em centrífugas, ou ainda como material quebradiço, nos leitos de secagem. A Tabela 2.5 correlaciona a concentração de sólidos com a consistência dos resíduos.

Tabela 2.5 - Característica dos resíduos em função do teor de sólidos.  
Fonte: Russell e Peck, 1997

Teor de Sólidos Totais	Consistência
0 a 5%	Líquido
8 a 12%	Esponjoso, semi-sólido
18 a 25%	Argila mole
40 a 50%	Argila rígida

Segundo Magalhães (2003), o resíduo de ETA é resultante da retirada de material particulado nas unidades do tratamento de uma água que recebe grandes quantidades de despejos de esgoto sanitário, drenagens urbana, drenagens de áreas rurais e efluentes industriais. Isto pode resultar em um manancial contaminado por fertilizantes, metais pesados e outras substâncias nocivas, percebendo facilmente que este resíduo pode causar sérios danos ao meio ambiente e a saúde pública.

O aproveitamento de lodos de ETAs na indústria de cerâmica vermelha pode diminuir o impacto ambiental gerado pelas retro-lavagens diárias evitando o descarte destes lodos de volta ao meio hídrico. Com a incorporação do lodo pode-se ainda reduzir a quantidade de argila utilizada, fazendo com que este recurso não renovável torne-se mais duradouro.

### **2.3.3 – Geração de lodo de ETA**

Para transformar a água bruta em água potável para consumo humano, as ETAs utilizam os processos de coagulação, floculação, decantação e filtração. Estes processos formam um resíduo sólido de características variáveis, que geralmente refletem as características da água bruta captada para tratamento, dos reagentes utilizados na coagulação e do processo de tratamento empregado (Andreoli et al., 2006).

Os coagulantes à base de Fe e Al são utilizados nas ETAs, na forma mais comum de sais de ferro ( $Fe^{+3}$ ) e alumínio ( $Al^{+3}$ ) que desestabilizam as partículas devido as suas cargas (Cordeiro, 1999). Segundo Reali (1999), as características dos lodos originados do uso de sais de ferro são similares aos lodos de sulfato de alumínio, com coloração marrom avermelhada e dificuldade na decantação e flotação, necessitando de adição de polímeros.

De acordo com Grandin (1993), a quantidade e também a qualidade do lodo depende da frequência de remoção dos decantadores, da qualidade físico-químico da água bruta, da qualidade final da água tratada, dos coagulantes e outros produtos utilizados durante o processo de tratamento, sendo o volume de lodo gerado diretamente proporcional à dosagem de coagulante utilizado no processo (Richter, 2001).

Reali (1999) afirma que as variações sazonais e a turbidez presente na água influenciam a taxa de geração do lodo, e ainda a produção do resíduo do lodo de ETA produzida pode ser estimada utilizando-se a vazão diária de água a ser tratada.

Os lodos de ETA, em geral, caracterizam-se pelo baixo conteúdo de compostos orgânicos (entre 5 e 25%) dependendo, contudo, da concentração desses produtos na água bruta (Silva Jr. e Isaac, 2002).

Os baixos índices de contaminação sanitária observados nos lodos de ETA avaliados por Andreoli (2006), demonstram que estes resíduos apresentam baixos riscos de contaminação ambiental e sanitária para a população e animais.

O lodo de ETA pode ser desidratado por meio natural ou mecânico, onde os principais métodos são:

- sistema de secagem natural: lagoas de lodo e leitos de secagem;
- sistema de desidratação mecânica: centrífuga, filtro a vácuo, filtro prensa e prensa desaguadora.

Segundo Ingunza et al. (2006), no setor de saneamento, os resíduos de disposição técnica e economicamente mais complexa são os lodos gerados nos tratamentos da água potável e dos esgotos sanitários. Apesar da composição dos lodos ser bastante variável em função de peculiaridades regionais e dos processos em que são gerados, é possível a sua incorporação em massa cerâmica como mostram as pesquisas de Duarte (2008), Cosin et al. (2004) e Morita et al. (2002).

## **2.4 – A CINZA DA LENHA**

### **2.4.1 - Generalidades**

Segundo Medeiros (2006), no estado de Goiás e no Distrito Federal, o combustível mais utilizado pelas indústrias de cerâmica vermelha é a lenha. Em decorrência do uso da lenha, as indústrias cerâmicas tornam-se também grandes geradoras de cinzas, como ilustra-se o acúmulo de cinzas em uma indústria apresentado na Figura 2.8.

O consumo médio de lenha é de 0,4 m<sup>3</sup>/milheiro. A lenha possui densidade de 0,4 t/m<sup>3</sup> e teor de cinzas da ordem de 3%. Estima-se uma geração mensal de aproximadamente 300 toneladas de cinzas em Campos dos Goytacazes, município situado no norte do Estado do Rio de Janeiro (Borlini, 2006). Essa grande quantidade de cinza gerada, quando é descartada de forma inadequada pelas indústrias cerâmicas, pode poluir o meio ambiente.



Figura 2.8 – Cinza gerada pelo consumo de lenha em indústria cerâmica de Goiás

Uma alternativa para o uso destas cinzas seria a sua utilização em cerâmica. Estudos têm sido crescentes nessa área. A influência de cinzas no processo e na qualidade da cerâmica pode variar significativamente, inclusive, trazer benefícios ao produto final Borlini et al. (2006).

Alguns estudos mostraram a influência da adição de cinzas pesadas de carvão mineral nas propriedades físicas e mecânicas de materiais cerâmicos (revestimento). Observou-se que adições de até 15% não promovem variações significativas nas propriedades do material (Kniess et al., 2003).

Aineto et. al. (2006) estudaram o papel de um novo tipo de cinza volante, vinda da gaseificação de carvão, como aditivo em argila. A cinza atuou como um aditivo que favoreceu o processo de sinterização a temperaturas usuais de fabricação de tijolos. As espécies com cinza apresentam uma melhoria dos valores de absorção de água e resistência mecânica em comparação com o material sem adição de cinza.

De acordo com Borlini et al. (2006), as cinzas constituem um resíduo, que contém entre outros elementos, metais, que podem causar poluição do ar e serem responsáveis por graves problemas respiratórios na população atingida. Uma alternativa tecnológica para reduzir o impacto ambiental causado pela liberação indiscriminada destes resíduos é a sua incorporação em produtos cerâmicos argilosos.

A incorporação de cinza de celulignina obtida a partir de pré-hidrólise de 50% de madeira e 50% de matéria orgânica do lixo em cerâmica vitrificada foi estudada por Pinatti et al. (2006). A cinza atuou como um potencial fundente durante a queima. A substituição parcial do feldspato pela cinza promoveu uma melhor vitrificação na cerâmica, com uma redução da absorção de água e um aumento da resistência mecânica aliada a uma total inertização dos metais potencialmente tóxicos na cerâmica com cinza.

Borlini et al. (2006) verificou que a cinza de lenha de eucalipto proveniente de indústrias cerâmicas de Campos dos Goytacazes é composta predominantemente por quartzo e carbonato de cálcio, apresentando ainda teor considerável de fundentes alcalinos e elevada perda ao fogo. O autor afirma ainda que o elevado percentual de óxidos alcalinos pode favorecer as reações de sinterização.

## **2.5 – A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM MATERIAIS CERÂMICOS**

Os produtos de cerâmica vermelha consistem em uma das alternativas mais promissoras para serem incorporadores de resíduos. De acordo com Callister (2002), a incorporação deve, entretanto, satisfazer simultaneamente certos critérios para se tornar viável:

- Ambiental, o processo de incorporação e os produtos incorporados não devem ser tão ou mais poluidores que o resíduo original.
- Técnico, o processo de incorporação e as propriedades do produto incorporado não devem ser prejudicados além de um valor tolerável.
- Econômico, o custo da incorporação não deve comprometer a comercialização dos produtos incorporados.

O grande volume de produção de componentes de cerâmica vermelha faz com que mesmo uma pequena quantidade de resíduo adicionada ao componente represente um grande volume total de resíduo incorporado. Adicionalmente, a cerâmica vermelha é fabricada a partir de matérias-primas variadas e, em geral, sem muito controle.

Algumas pesquisas têm mostrado que a indústria cerâmica já possui uma grande capacidade de absorver além dos lodos de ETAs, as cinzas de casca de arroz, dentre outros, em função da similaridade de sua composição química com argilas normalmente utilizadas no processo cerâmico. No entanto, a distância entre a fonte do resíduo e a

cerâmica e o conteúdo de sólidos do lodo são fatores determinantes no êxito dessa aplicação.

O processo de fabricação de produtos cerâmicos é também bastante variado e rudimentar e os produtos finais não são de alto desempenho. Isto faz com que a adição de resíduos em limitadas quantidades não cause mudança no processo de fabricação nem comprometa as propriedades dos artigos fabricados. A incorporação de resíduos diversos à cerâmica vermelha é tema de diversas pesquisas. (Arkhipov et al., 1979)

O aproveitamento de resíduo como matéria-prima cerâmica tem na realidade, efeitos positivos nas propriedades dos produtos cerâmicos semi-acabados e acabados, ainda que alguns casos, o desempenho possa piorar em alguns aspectos. Os efeitos do resíduo influenciam em todas as fases do processo (moldagem, secagem e sinterização) e tem repercussão em propriedades dos produtos acabados, tais como, retração, porosidade, absorção de água e resistência mecânica. (Macedo, 1996)

De acordo com Dondi (1997), a incorporação de resíduos sólidos industriais e municipais em argilas para fabricação de cerâmica vermelha tornou-se uma prática bastante investigada no meio científico. Isto é atribuído à possibilidade de se dar uma destinação final ambientalmente correta aos resíduos bem como uma inertização de elementos potencialmente tóxicos. O mesmo autor comenta que alguns tipos de resíduos podem ainda contribuir para melhorar o processamento da cerâmica e suas propriedades tecnológicas.

Segundo Magalhães (2003) e Duarte (2008), o lodo proveniente de tratamento de água e esgoto pode ser incorporado à massa cerâmica em percentuais entre 40 a 60%, tendo em vista sua composição mineralógica, sem alterar de forma significativa as propriedades físicas das peças produzidas.

Santos (2003) confirmou a viabilidade técnica, ambiental, ocupacional, econômica e de mercado das possibilidades de reciclagem das tortas de lodo de ETE da região metropolitana de São Paulo.

O aspecto principal da incorporação do lodo à massa cerâmica é, segundo este autor, a contribuição na minimização de um problema ambiental, considerando que a argila representa uma parcela insignificante no valor final do produto.

### **3 – MATERIAIS CERÂMICOS**

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica onde se trata da microestrutura dos materiais cerâmicos e à indústria cerâmica, uma introdução sobre a matéria-prima básica desta indústria, a argila, bem como as estruturas cristalinas. Por fim, trata-se das características e propriedades das argilas utilizadas para os produtos cerâmicos

#### **3.1 – MICROESTRUTURA**

##### **3.1.1 - Introdução**

Os materiais cerâmicos podem ser definidos como sendo materiais formados por compostos cerâmicos de elementos metálicos (Al, Na, K, Mg, Ca, Si, etc) e os seguintes elementos não-metálicos: O, S, N, C e P. Esses elementos são unidos por ligações iônicas e/ou covalentes. Os materiais cerâmicos mais frequentes são constituídos de óxidos, nitretos e carbetos. A maior parte das fases cerâmicas é cristalina, no entanto, existem também materiais cerâmicos com estrutura amorfa, como os vidros (Van Vlack,1973).

As argilas são aluminossilicatos, sendo compostas por alumina ( $Al_2O_3$ ) e sílica ( $SiO_2$ ), ligada quimicamente com água. Existe uma variedade de características físicas, composições químicas e estruturas. Observam-se como as impurezas mais comuns os compostos (geralmente óxidos) à base de bário, cálcio, sódio, potássio e ferro, além de alguns materiais orgânicos (Callister, 1991)

Segundo Askeland (1990), a sílica ( $SiO_2$ ) é provavelmente o material cerâmico de uso mais amplo e que constitui a base de muitos vidros e vidro-cerâmicos. Os materiais com base em sílica são muito usados em isolamentos térmicos, como refratários ou abrasivos, em fibras para reforço de materiais compósitos, em vidraria de laboratório, etc.

A cerâmica é a pedra artificial obtida pela moldagem, secagem e cozimento de argilas ou de misturas de materiais contendo substância. Nos produtos cerâmicos a argila fica

aglutinada por pequena quantidade de vidro, que surge pela ação do calor de cocção sobre os minerais argilosos (Bauer, 2000).

De acordo com Van Vlack (1973), as principais características dos materiais cerâmicos são: alta dureza, boa resistência mecânica (a resistência à compressão é muito maior do que a resistência a tração), ruptura frágil, alta estabilidade química e térmica (alto ponto de fusão) e baixas condutividades elétrica e térmica.

Segundo Callister (2002), a maioria dos produtos à base de argila se enquadra dentro de duas classificações abrangentes: os produtos estruturais à base de argila e as louças brancas. Os produtos estruturais à base de argila incluem os tijolos e blocos de construção, os azulejos e as tubulações de esgoto. Já os materiais cerâmicos abrangem as louças brancas que se tornam brancas após um cozimento a uma temperatura elevada, tais como porcelanas, louças de barro, louças para mesa e louças sanitárias.

### **3.1.2 – Estruturas cristalinas das fases cerâmicas**

As estruturas cristalinas para os minerais à base de argila são relativamente complicadas, entretanto uma característica que prevalece é uma estrutura em camadas. Os minerais argilosos mais comuns que são de interesse possuem o que é conhecido por estrutura da caolinita. Quando adiciona-se água, as moléculas de água se posicionam entre essas lâminas em camadas e formam uma película fina ao redor das partículas de argila. As partículas ficam, dessa forma, livres para se moverem umas sobre as outras, o que é responsável pela plasticidade resultante da mistura água-argila. (Callister, 2002).

A classificação quanto à estrutura das cerâmicas cristalinas agrupa as fases cerâmicas em estruturas mais simples ou comuns e as de estruturas complexas. Uma vez que as cerâmicas são compostas por pelo menos dois elementos, e frequentemente mais do que isso, as suas estruturas cristalinas são em geral mais complexas do que as dos metais. Além dessas estruturas, tem-se também a estrutura cristalina dos silicatos.

De acordo com Cascudo (2007), as estruturas cerâmicas mais simples se restringem a combinações de arranjos iônicos cúbicos simples, cúbicos de faces centradas e hexagonais compactos e de posições intersticiais. Porém, a maior parte dos materiais

cerâmicos não possui estruturas tão simples. Askeland (1990) classifica esses arranjos cerâmicos mais complexos em quatro categorias: arranjos da perovskita, do coríndon, do espinélio e da grafita.

A célula unitária da perovskita é encontrada em várias cerâmicas condutoras elétricas tais como o  $\text{BaTiO}_3$  e o  $\text{SrTiO}_3$ , sendo formada pela presença de três diferentes íons. Em relação à estrutura do coríndon, tem-se uma estrutura hexagonal como a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sendo de natureza refratária, isolante elétrica e com características abrasivas. A estrutura do espinélio consiste em uma célula unitária cúbica, como exemplo o  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , além de outras cerâmicas importantes de características elétricas e magnéticas. A grafita é uma das formas cristalinas do carbono com estrutura hexagonal em camadas, utilizado como material refratário e também como lubrificante e fibra.

Os silicatos são materiais compostos principalmente por silício e oxigênio, os dois elementos mais abundantes na crosta terrestre e, conseqüentemente, a maior parte dos solos, rochas, argilas e areia se enquadram nesta classificação. A unidade fundamental na qual se baseia a estrutura de todos os silicatos consiste em quatro íons de oxigênio nos vértices de um tetraedro regular rodeando o íon de silício. Além do cimento Portland, agregados naturais para concretos, tijolos, telhas e vidros são exemplos de materiais no qual estão presentes os silicatos.

### **3.2 – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CERÂMICOS**

Verçoza (1987) afirma que as argilas são constituídas, essencialmente, de partículas cristalinas extremamente pequenas, formadas por um número restrito de substâncias denominadas argilo-minerais. Os argilo-minerais são silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio com alguma percentagem de álcalis ou alcalinos terrosos, podendo-se encontrar a sílica, alumina, ferro, cálcio, magnésio, matéria orgânica, etc.

Os tipos de argilo-minerais e seus componentes conferem algumas características e propriedades importantes ao material cerâmico. Petrucci (1998) e Verçoza (1987) afirmam que o caulim, por exemplo, é uma argila com predomínio de caulinita, pó de cor branca que é matéria-prima para a porcelana, e conforme o seu grau de pureza pode ser usado também para louças, refratários, azulejos e outros materiais. O óxido de ferro,

comum nas rochas ígneas, comumente mistura-se com a caulinita e lhe confere a cor vermelha ou amarelada da maioria das argilas.

De acordo com Cascudo (2007), assim como os demais materiais, as propriedades dos materiais cerâmicos dependem de suas estruturas. Os materiais cerâmicos possuem uma estabilidade térmica relativamente alta devido às ligações iônicas existentes. Além disso, são bons isolantes térmicos, explicado pelas suas ligações que não possuem elétrons livres na superfície. Os materiais cerâmicos possuem também baixo coeficiente de dilatação térmica quando comparados ao aço, por exemplo, como apresentado na Figura 3.1.

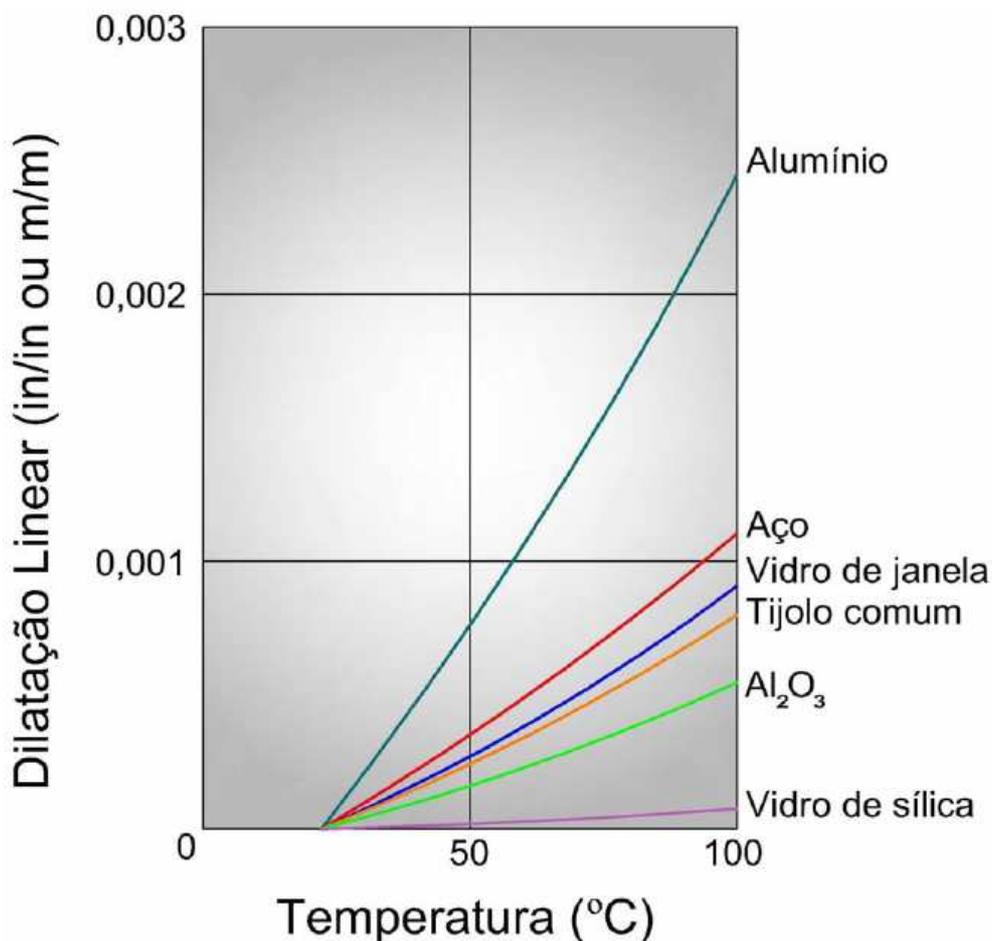


Figura 3.1 – Dilatação térmica de alguns materiais de construção  
Fonte: Cascudo, 2007 adaptada de Van Vlack, 1973

As cerâmicas apresentam boa resistência mecânica, sendo que as resistências à compressão e ao cisalhamento são muito maiores do que a resistência à tração. Segundo Van Vlack (1973), esses materiais são frágeis com relação ao seu comportamento dúctil

e podem ser solicitados por tensão de compressão muito elevadas, desde que não existam poros presentes.

Segundo Cascudo (2007), a maioria dos materiais cerâmicos tem como característica a dureza, que se dá devido a pouca ou nenhuma deformação plástica, explicada pelos elevados níveis de ligação existente entre os átomos, exceto quando o material possui falhas ou defeitos na sua estrutura interna ou até mesmo o surgimento de poros e vazios estruturais. São conhecidos também por serem isolantes elétricos devido à imobilidade dos elétrons resultante das ligações iônicas e covalentes.

Segundo Bauer (2000), Petrucci (1998) e Souza Santos (1989), a água também é um mineral integrante das argilas. As formas incluem: a) água livre – que preenche os poros e vazios formados pelos grãos; b) água adsorvida – que adere à superfície das partículas coloidais, separando-as e facilitando a trabalhabilidade no processamento dos produtos cerâmicos e; c) água de constituição – que forma parte da rede cristalina dos argilominerais.

### **3.3 – A INDÚSTRIA CERÂMICA**

#### **3.3.1 – Histórico**

As cerâmicas ou os materiais cerâmicos compreendem todos os materiais de emprego em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, excetuados os metais e suas ligas, que ficam utilizáveis geralmente pelo tratamento em temperaturas elevadas. Os materiais cerâmicos são: materiais de cerâmica vermelha (ou estrutural), materiais de cerâmica branca, materiais refratários, vidros, cimento Portland, cales e gessos. (Souza Santos, 1989).

A história da cerâmica vermelha remonta a cerca de sete mil anos na história da humanidade, no Oriente Médio. Inicialmente utilizou-se o tijolo de adobe (cerâmica crua) como substituto das pedras de cantaria. Embora de menor durabilidade, apresentou a vantagem de uma maior trabalhabilidade da argila na execução dos elementos e alvenarias.

A palavra cerâmica é derivada da palavra grega “kerameicos”, que significa “feito de terra” (Souza Santos, 1989). O processo de fabricação de produtos originados da cerâmica vermelha é bastante conhecido, sendo dominado por diversas civilizações antigas como a China, Babilônia e Grécia Helênica. O homem ao longo da história tem produzido artigos cerâmicos para utilidade doméstica onde expressa suas crenças e sentimentos.

O surgimento das primeiras máquinas moldadoras para fabricação de tijolos, movimentadas por força animal ocorreu por volta de 1850, sendo mais tarde substituídas por máquinas a vapor e possibilitando, assim, o aumento significativo da produção. Pode-se considerar esse fato como sendo o primeiro grande salto para a indústria da cerâmica vermelha, pois possibilitou a fabricação de peças especiais e dos blocos (Steil, 2000). Com isso, a indústria cerâmica evoluiu rapidamente, desenvolvendo novos materiais que ampliaram consideravelmente as opções e tipos de revestimentos disponíveis.

No Brasil há grandes jazidas de argilas, com importância em diversas áreas, principalmente na indústria de cerâmica vermelha. Este tipo de indústria abrange a fabricação de produtos a base de argilas (Bustamante, 2000). Produtos tais como tijolos, blocos cerâmicos, lajotas e telhas são destinados a indústria da construção civil, compreendendo cerca de 13.000 pequenas e médias unidades produtivas dispersas por todo o país (Oliveira, 2004).

O grande consumidor de produtos de cerâmica vermelha é a indústria da construção civil. Sua utilização, porém, algumas vezes, é dificultada pela não conformidade desses componentes. Segundo Selhorst (2001), o universo produtor se estende desde as microolarias, com processo de produção totalmente manual e rústica, até as empresas de médio porte com produção automatizada e bastante uniforme.

De acordo com a ABC (2009), o setor industrial da cerâmica é bastante diversificado e pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica e isolantes térmicos.

### 3.3.2 – Argilas para Produtos Cerâmicos

As argilas são materiais terrosos naturais, de granulação final, as quais adquirem alta plasticidade quando adicionadas de certa quantidade de água. Quimicamente as argilas são formadas por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio; são constituídas por partículas cristalinas de pequenas dimensões, formadas por argilominerais, (silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio) (VERCOSA, 1987).

A argila é utilizada como matéria-prima na indústria cerâmica, pois proporciona plasticidade e resistência mecânica após queima adequada. Permite a utilização de técnicas de processamento simples e se encontra disponível em grandes quantidades. (Vieira et al, 2000). Geralmente, são utilizadas argilas sedimentares recentes de margens de rios, lagos ou várzeas que contém matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Souza Santos, 1989).

Em geral, não se encontram argilas puras, mas misturadas, ainda que predomine um mineral determinante. Frequentemente há diferenças acentuadas até na mesma jazida, com diferentes espécies de argilas (Petrucci, 1998).

De acordo com Petrucci (1998), na preparação industrial das pastas, adiciona-se água às argilas para que estas possam ser moldadas. Essa água de amassamento não é considerada no estado da desidratação, porém ela é eliminada a baixas temperaturas. Quando perde toda a água, o bloco cerâmico adquire dureza e sonoridade, aumentando a sua porosidade.

A partir das matérias-primas utilizadas, as massas podem ser classificadas em simples (ou natural) e compostas (ou artificial). As massas simples são aquelas formadas por uma única matéria-prima, que contém as necessárias proporções entre os minerais, que permitem a manufatura da peça cerâmica desejada. Essas massas são constituídas apenas por argila, podendo conter a mistura de mais de uma argila, ou de materiais argilo-arenosos e são geralmente utilizadas na fabricação de telhas, tijolos e revestimento de via-seca. As massas compostas consistem na mistura de diversas matérias-primas, como por exemplo, a argila e algum tipo de resíduo (Motta et al., 2002).

Conforme Van Vlack (1973), outras matérias-primas também são diretamente usadas nos processos de conformação para obtenção de materiais cerâmicos para revestimento, tais como: calcário, quartzo e minerais semelhantes, já citados como: feldspatos, talcos, filitos. A maioria desses materiais está abundantemente distribuída na natureza, e sua seleção se faz em dois critérios:

- economia de mineração e transporte;
- ausência (ou presença) de impurezas.

### 3.3.2.1 – Características das argilas

Motta et al. (2004) classificam as argilas em dois grupos principais, com base na cor de queima (principal característica) e na mineralogia (característica secundária), destacando o vínculo com a cor nos setores de aplicação industrial, a saber:

a. Argilas de queima avermelhada: matéria-prima para cerâmica vermelha, placas cerâmicas de revestimentos (inclui principalmente os produtos da via seca e, secundariamente, pisos extrudados avermelhados e via úmida), agregado leve, vasos, potes e outras peças utilitárias e de decoração, de corpo avermelhado;

b. Argilas caulínicas de queima clara (argilas plásticas e caulim para cerâmica branca): matérias primas utilizadas em cerâmica sanitária, placas cerâmicas via úmida, porcelana técnica e artística.

Na produção de blocos são, geralmente, utilizadas argilas quaternárias e, às vezes, terciárias, das margens de rios, lagos ou várzeas, ricas em ferro e álcalis, de granulometria fina e contendo teor apreciável de matéria orgânica. A composição mineralógica destas argilas é a de uma mistura de caulinita, com illita ou montmorilonita ou desses minerais em camadas mistas, além de apreciáveis teores de compostos de ferro (Souza Santos, 1989).

Segundo Menezes et al. (2001), as argilas plásticas para cerâmica vermelha são argilas quaternárias recentes de elevada plasticidade adequadas à conformação por extrusão. Após a conformação possui resistência mecânica para as manipulações anteriores a queima e quando queimadas em temperaturas da ordem de 900 °C apresentam características físicas, tais como absorção de água, resistência mecânica e porosidade, que suportam seu uso para fins de cerâmica vermelha.

Coelho (2002) considera a composição própria para a produção, quando apresenta as seguintes condições:

- a relação de materiais plásticos (argilominerais) com materiais não plásticos (quartzo, feldspato, carbonatos, matéria amorfa, substância orgânica) deve ser tal que confira à massa cerâmica plasticidade suficiente para permitir a conformação e proporcionar adequada resistência mecânica a verde e;

- a composição químico-mineralógica deve ser equilibrada de modo que, no processo de queima, as transformações físico-químicas que ocorrem, produzam as quantidades necessárias de fase vítrea, com viscosidade adequada; evite a deformação das peças e confira ao produto acabado as características tecnológicas desejadas (coeficiente de dilatação térmica, resistência mecânica, porosidade e outros)

De acordo com Souza Santos (1989), a plasticidade das argilas está diretamente correlacionada com fatores da própria matéria-prima, tais como: composição mineralógica, dimensões e formato das partículas e da presença de outros minerais, além dos argilominerais. A plasticidade é maior em argilas com maior teor de minerais argilosos e maior porcentagem de grãos finos.

Petrucci (1998), afirma que apesar de grande percentagem de areia com silte ser indesejável, esta deve ser, às vezes, adicionada à massa cerâmica, para diminuir a retração na queima e aumentar a refratariedade.

### 3.3.2.2 – Propriedades das argilas

As argilas utilizadas para a produção de componentes cerâmicos são constituídas basicamente de argilominerais como a caulinita e illita. A caulinita é utilizada para a confecção de materiais refratários, enquanto que a illita é mais adequada para a fabricação de cerâmica vermelha. Os principais elementos constituintes dos argilominerais são apresentados na Tabela 3.1 com suas principais propriedades.

Tabela 3.1 – Propriedades dos principais elementos constituintes das argilas  
 Fonte: Kazmierczak, 2007

Elementos	Principais propriedades
Alumina	Propicia estabilidade dimensional em temperaturas elevadas.
Carbonato e sulfato de cálcio e magnésio	Resultam em expansão volumétrica; agem como fundentes.
Matéria orgânica	Resulta em retração, fissuras durante os processos de sazonalidade e queima e diferenças de coloração em um mesmo componente cerâmico.
Sílica livre	Diminui a retração durante os processos de sazonalidade e queima; reduz a plasticidade da argila.
Silicatos e fosfatos	São fundentes, alguns aumentam a resistência da cerâmica
Sais solúveis	Propiciam o aparecimento de eflorescências nos componentes cerâmicos

Conforme Souza Santos (1989), as principais propriedades das argilas para a produção de blocos cerâmicos são definidas pela plasticidade, pela granulometria e também pelo seu comportamento ao calor.

*- Comportamento do calor*

Em relação ao comportamento ao calor, Pracidelli (1981) ressalta a importância do processo de queima na qualidade do produto cerâmico e comenta que durante o processo de queima, à medida que a temperatura aumenta, observam-se os seguintes fenômenos:

- um pouco acima de 100 °C ocorre a eliminação da água higroscópica ou de capilaridade, ou seja, da umidade remanescente na peça, que ocorre quando a secagem não foi absolutamente perfeita ou se a peça tiver reabsorvido umidade do ambiente;

- a mais ou menos 200 °C ocorre a eliminação da água coloidal (também chamada de plasticidade ou água adsorvida), aquela que permanece nas partículas da argila, mesmo com uma boa secagem.;

- entre 350 °C e 650 °C acontece a decomposição das substâncias orgânicas com liberação da água de constituição e a eliminação de gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Essas substâncias podem estar contidas nas argilas em maior ou menor quantidade. Nesta

faixa de temperaturas se inicia também a dissociação dos sulfetos e dos sulfatos com a liberação de gás sulfuroso;

- entre 800 °C e 950 °C dá-se a decomposição dos carbonatos, como por exemplo, os calcários e dolomitas, com liberação de gás carbônico (CO<sub>2</sub>);

- a partir de 900 °C constata-se a reação química da sílica e da alumina com os elementos fundentes, reação que dá lugar à formação de silico-aluminatos complexos, que proporcionam ao corpo cerâmico as características de dureza, estabilidade e resistência a vários agentes químicos;

- acima de 1000 °C a temperatura máxima de queima para a cerâmica vermelha, há variação de características de acordo com a composição química e mineralógica da massa, proporcionando a dureza, a compactação e a impermeabilidade (sinterização) desejadas.

#### *- Plasticidade*

Segundo Souza Santos (1989), a plasticidade é a propriedade que um sistema possui de se deformar pela aplicação de uma força e de manter essa deformação quando a força aplicada é retirada. A água de plasticidade é a água adicionada à argila necessária para torná-la plástica e ser moldada por um determinado método, geralmente por extrusão. A plasticidade costuma ser avaliada por meio dos limites de Atterberg, normatizados pela ABNT NBR 7180:1984 e ABNT NBR 6459:1984. O limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de plasticidade, que são conceituados a seguir:

- Limite de plasticidade - é determinado pelo rolamento da massa plástica sobre uma placa de vidro, de modo a formar um cilindro com diâmetro em torno de 3mm e 15 cm de comprimento por ocasião da fragmentação do material.

- Limite de liquidez - é determinado através do ensaio no aparelho de Casagrande. Coloca-se a massa plástica de argila na canha do aparelho até a altura de aproximadamente 1 cm, com a utilização de um cinzel apropriado, a massa é dividida em duas partes e, através de golpes aplicados pelo acionamento de manivela que movimenta um excêntrico, faz-se unir as bordas da caneta.

- Índice de plasticidade - é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Quanto maior for o índice, mais plástica será a argila e por meio deste poderá ser determinado o método de conformação mais adequado para o material.

Caputo (1988) classificou os solos em função do índice de plasticidade, em: fracamente plástico: ( $1 < IP < 7$ ); medianamente plástico: ( $7 < IP < 15$ ) e altamente plástico ( $IP > 15$ ).

*- Composição Granulométrica*

A composição granulométrica da argila tem íntima relação com sua resistência no estado seco ao ar. A distribuição do tamanho das partículas mais adequada para uma argila oferecer boa resistência à flexão é aquela que possui minerais argilosos em torno de 60%, estando o resto do material dividido igualmente entre silte, areia fina e média Petrucci (1998).

A composição granulométrica de massas cerâmicas é formada por argilas plásticas além de grãos finos, médios e grossos para se atingir uma granulometria adequada. A Tabela apresenta essas composições granulométricas para a fabricação de diferentes produtos cerâmicos.

Tabela 3.2 – Composição granulométrica recomendada para a confecção de produtos de cerâmica vermelha  
Fonte: Pracidelli e Melchiades, 1997

Tipo de produto	Composição granulométrica		
	2 $\mu$ m	2 a 20 $\mu$ m	20 $\mu$ m
Materiais com dificuldade de produção	40 a 50	20 a 40	20 a 30
Telhas, capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	25 a 55

Tem-se a argila plástica (porcentagem inferior a 2 $\mu$ m), argila arenosa (porcentagem entre 2 e 20  $\mu$ m) e a desplastificação (porcentagem da fração superior a 20 $\mu$ m).

Pracidelli e Melchiades (1997) já alertavam para a importância da composição granulométrica para a definição da formulação das massas para a cerâmica vermelha. Os autores observaram que as argilas de granulométrica muito fina apresentam boa plasticidade e alta resistência mecânica, mas precisam de uma quantidade considerável

de água para desenvolver esta plasticidade; as argilas pouco plásticas reduzem a necessidade de água, proporcionando uma redução do ciclo de secagem.

#### *- Retração Linear*

A retração é a tendência que a argila tem em diminuir de volume pela perda de umidade por secagem e queima, e tem como consequência as reações físicas e químicas das argilas quando submetidas à ação do calor, pois quando ocorre a queima de um corpo cerâmico há uma nova redução de volume, relacionada à perda da água de constituição, e à redução ou eliminação dos poros. Esta segunda retração é denominada retração de queima (Cardoso 1995).

### **3.4 – PROPRIEDADES DE BLOCOS E REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

Segundo Reed (1995), as propriedades dos materiais cerâmicos são determinadas pelas características atômicas e microestruturais dos materiais que os compõem. Estas características podem ser controladas pela seleção das matérias-primas, processo de fabricação e produto. É fundamental o controle para que os defeitos microestruturais sejam minimizados.

#### **3.4.1 – Absorção de Água**

A absorção de água do material cerâmico queimado é um parâmetro utilizado para medir a porosidade aberta e avaliar a fundência do material. Segundo Casagrande (2002), a absorção da água é definida como o ganho em peso, expresso em porcentagem, que a peça apresenta quando introduzidas em água em ebulição durante um período de tempo determinado.

A absorção de água é um importante fator que interfere na durabilidade dos materiais cerâmicos, pois está relacionada com a resistência aos ataques químicos e físicos do meio ambiente. A absorção de água decresce com o aumento da temperatura de queima.

### **3.4.2 – Porosidade**

Segundo Oliveira (2002), porosidade é a relação entre o volume de poros e o volume total aparente do material (argila ou cerâmica), sendo função da natureza dos constituintes, forma, tamanho e posição relativa das partículas e também dos processos de fabricação.

O mesmo autor afirma que a porosidade influi nas propriedades da argila e da cerâmica com a forma de:

- a absorção de água aumenta na razão direta da porosidade,
- a condutividade térmica, a condutividade elétrica e a massa específica aparente do material diminuem com o aumento da porosidade do material.

A porosidade também afeta o módulo de elasticidade do material. O aumento da porosidade sempre resulta num decréscimo da elasticidade (Richerson, 1982). Logo, o aumento da porosidade aumenta a fragilidade dos materiais, diminuindo a sua resistência mecânica, por potencializar o surgimento de falhas no material. Uma propriedade bastante relacionada com a porosidade é a absorção de água.

### **3.4.3 – Módulo de Ruptura à Flexão**

O módulo de ruptura à flexão (MRF) é uma medida das características coesivas do material, relacionadas ao grau de compactação e consistência. Ela pode ser utilizada também para avaliar a sinterabilidade de um material (Salge & Barzaghi 1982). Os valores da MRF aumentam com o acréscimo de temperatura de queima. Isto é devido ao aumento da densificação do material, ou seja a redução da porosidade do material cerâmico.

De acordo com Salge & Barzaghi (1982), os valores do MRF sugeridos para a fabricação de produtos de cerâmicas vermelhas para o uso na construção civil são:

- Tijolos Maciços –  $MRF > 2,0MPa$ ;
- Blocos Cerâmicos –  $MRF > 5,5MPa$ ;
- Telhas –  $MRF > 6,5MPa$ .

### **3.5 – Classificação dos Produtos Cerâmicos**

Após a etapa de sinterização, os produtos cerâmicos são classificados visualmente e em seguida procede-se para uma avaliação das propriedades físicas, químicas e mecânicas.

#### **3.5.1 – Classificação de Bloco Cerâmico**

A ABNT NBR 15270-1:2005 estabelece os requisitos para caracterização geométrica, física e mecânica dos blocos cerâmicos.

Conforme a ABNT NBR 15270-1:2005, a tolerância dimensional individual relacionada à dimensão efetiva do bloco cerâmico é de  $\pm 5$  mm e a tolerância dimensional relacionada à média é de  $\pm 3$  mm. A espessura mínima das paredes externas é de 7 mm e a espessura mínima das paredes dos septos é de 6 mm. Quanto ao desvio em relação ao esquadro, e a planeza das faces o valor máximo deve ser de 3 mm.

Conforme a ABNT NBR 15270:2005, o índice de absorção de água não deve ser inferior a 8%, nem superior a 22%.

De acordo com a mesma norma, a propriedade mecânica dos blocos cerâmicos é a resistência à compressão individual. De acordo com a norma referida anteriormente, o limite mínimo da resistência à compressão de cada bloco de vedação, usados com furos na horizontal, deve ser igual a 1,5 MPa, e para blocos estruturais com furos na vertical a resistência mínima deve ser igual a 3,0 MPa.

#### **3.5.2 – Classificação de Revestimento Cerâmico**

Os revestimentos cerâmicos adquirem suas propriedades finais tão logo tenha sido concluído todo o seu processamento, principalmente após a fase de sinterização ou queima, cujo objetivo maior é desenvolver as microestruturas adequadas por meio da transformação físico-química das massas cerâmicas.

Nos critérios definidos pela ABNT NBR 13817:1997 para classificação de revestimento cerâmico estão os parâmetros de absorção de água e resistência mecânica que são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Classificação dos revestimentos cerâmicos  
Fonte: ABNT NBR 13817, 1997

Grupos	Absorção de Água (%)	Resistência Mecânica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Definição do Produto
BIa	$0 < \text{Abs} \leq 0,5$	350 a 500	Porcelanato
BIb	$0,5 < \text{Abs} \leq 3,0$	300 a 450	Grés
BIIa	$3,0 < \text{Abs} \leq 6,0$	220 a 350	Semi-grés
BIIf	$6,0 < \text{Abs} \leq 10,0$	180 a 220	Semi-poroso
BIII	Abs acima de 10,0	150 a 220	Poroso

A resistência mecânica de um material, uma das principais propriedades dos materiais cerâmicos, se comporta inversamente proporcional com a absorção de água. Isto porque, a absorção de água tem relação direta com a porosidade e seu tamanho de grão; em outras palavras, uma maior resistência mecânica é obtida quando há simultaneamente baixa porosidade e pequeno tamanho de grão.

## **4 – PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS**

Neste capítulo é abordado o alguns conceitos de delineamento de misturas e a metodologia para a otimização de experimentos utilizada neste trabalho.

### **4.1 – O DELINEAMENTO DE MISTURAS**

A estatística trabalha com a coleta, a apresentação, a análise e o uso dos dados para tomar decisões, resolver problemas e planejar produtos e processos. Dentre diversas técnicas de análise e planejamento experimentais, o uso do delineamento de misturas vem crescendo continuamente, pois muitos materiais são formados pela mistura de vários componentes e as propriedades do produto manufaturado dependem das proporções dos componentes na formulação (Cornell, 1990).

O delineamento de misturas permite a escolha de modelos matemáticos significativamente eficazes para previsão das propriedades mecânicas a partir do conhecimento prévio das propriedades de cada componente original, bem como das composições em determinadas proporções fundamentais, fazendo apenas alguns experimentos. Com esta metodologia é possível otimizar os custos envolvidos no desenvolvimento de novos materiais em função das quantidades de matérias-primas e aditivos cerâmicos. É possível ainda, através do uso da metodologia de superfícies de resposta, delimitar a gama de composições que permite produzir um corpo cerâmico com características pretendidas, sujeito a restrições impostas pelo processo de fabricação.

Uma prática que é comumente adotada durante a confecção de peças cerâmicas é a mistura de diferentes tipos de argilas, realizada muitas vezes de maneira intuitiva e empírica, onde as características do produto são fortemente dependentes das proporções usadas nessas composições. Alexandre et al. (2001) apresentam uma metodologia numérica, utilizando o planejamento em rede simplex, na previsão das propriedades mecânicas de peças cerâmicas vermelhas. Curto et al. (2003) apontam a importância da utilização do delineamento de misturas na investigação da composição e da plasticidade na resistência mecânica de massas cerâmicas triaxiais.

Este tipo de ferramenta mostrou-se útil na indústria cerâmica, no desenvolvimento de formulação de massas cerâmicas e esmaltes em alguns trabalhos. Utilizando técnicas de delineamento experimental e otimização, Correia et al. (2005) avaliaram o efeito simultâneo das características e conteúdo de três argilas nas propriedades de composições para cerâmica vermelha estrutural. Concluíram que através das técnicas empregadas, foi possível selecionar as melhores combinações das três argilas para produzir um tijolo estrutural com propriedades específicas.

#### 4.2 – METODOLOGIA DO DELINEAMENTO DE MISTURAS

O propósito geral em um experimento com composições é tornar possível, por meio de superfícies de resposta, a estimativa das propriedades de um sistema multicomponente, a partir de um número limitado de observações. Essas observações são obtidas de combinações pré-selecionadas dos componentes na tentativa de se determinar quais delas, de alguma maneira, otimizam a resposta (Barros Neto et al., 1996).

No planejamento experimental utilizado para composições, as propriedades de uma composição são determinadas pelas proporções de seus componentes, onde a soma de todas elas deve totalizar 100%. Para uma mistura de q componentes, tem-se:

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1 \quad (1)$$

A partir da expressão 1, observa-se que as proporções dos componentes devem ter soma igual a 1, já que as proporções  $x_i$  são variáveis dependentes, ou seja, a alteração da proporção de um dos componentes da formulação causará mudança na proporção de pelo menos um dos outros componentes.

No caso de mistura de três componentes, a Equação 1 torna-se,

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1. \quad (2)$$

Essa equação corresponde geometricamente a um triângulo equilátero inscrito no cubo, Figura 4.1. As diferentes composições possíveis são representadas pelos pontos pertencentes ao triângulo. Os vértices correspondem aos componentes puros e os lados às composições binárias, enquanto os pontos situados no interior do triângulo representam as possíveis composições de três componentes.

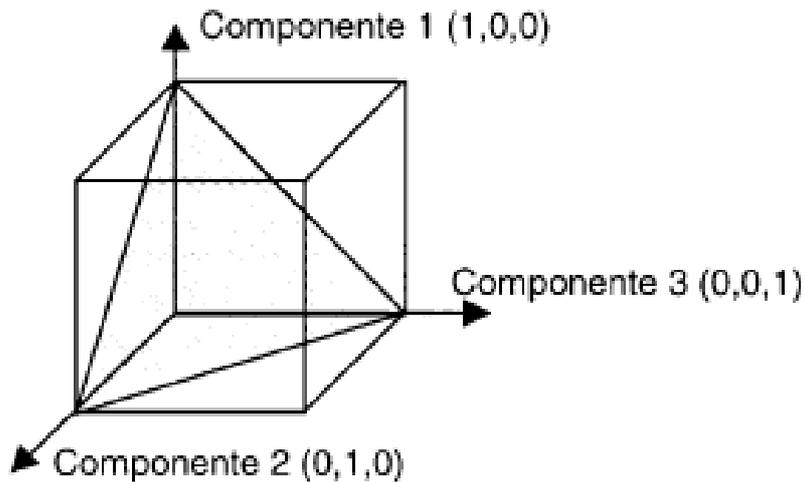


Figura 4.1 – Espaço experimental para processos com três variáveis

Um planejamento simplex  $\{q, m\}$  consiste de pontos que são definidos pelo conjunto de coordenadas, onde as proporções de cada componente são tomadas a  $m+1$  valores igualmente espaçados de 0 a 1,

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad \text{onde } i = 1, 2, \dots, q \quad (3)$$

e todas as combinações possíveis são formadas usando as proporções dos componentes da Equação 3.

Para um sistema com  $q = 3$  componentes, o fator de espaço disponível é um triângulo equilátero e as proporções de cada componente serão 0,  $\frac{1}{2}$ , 1 quando  $m = 2$ . Então o simplex  $\{3, 2\}$  consiste de seis pontos localizados nas arestas do triângulo:  $(x_1, x_2, x_3) = (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0), (\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}), (0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ .

Os três pontos  $(1, 0, 0)$  ou  $x_1 = 1, x_2 = x_3 = 0$ ,  $(0, 1, 0)$  ou  $x_1 = x_3 = 0, x_2 = 1$  e  $(0, 0, 1)$  ou  $x_1 = x_2 = 0, x_3 = 1$  representam os componentes puros e estão localizados nos três vértices do triângulo. Os pontos  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$ ,  $(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$  e  $(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$  representam as combinações binárias ou composições de dois componentes  $x_i = x_j = \frac{1}{2}, x_k = 0, k \neq i, j$ , e estão localizados no centro das arestas (lados) do triângulo.

O simplex  $\{3, 2\}$  é mostrado na Figura 4.2a. Cada uma das proporções dos componentes na formulação é um número fracionário e a soma das frações é igual a um. Quando delimitados numa rede esses pontos formam um arranjo simétrico com relação aos vértices e lados do simplex.

Uma abordagem alternativa da rede simplex é o simplex com pontos no centróide apresentado na Figura 4.2b. Nesse tipo de planejamento, existirão além de  $2q - 1$  pontos, os pontos do centróide  $(1/q)$ . Assim, quando pretende-se observar a influência real da mistura dos  $q$  componentes, utiliza-se o planejamento simplex centróide.

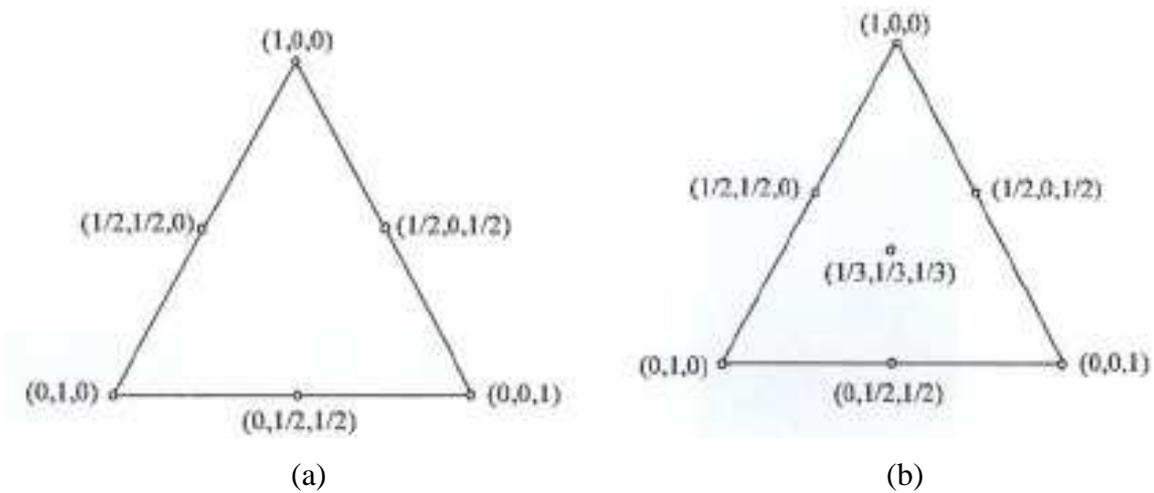


Figura 4.2 – Arranjos simplex para três componentes. a) sem ponto centróide. b) com ponto centróide

Fonte: Cornell, 1990

Os pontos no interior do espaço simplex representam misturas em que todas as proporções dos componentes são diferentes de zero. O ponto central representa uma mistura onde as proporções dos componentes são iguais; os meios dos lados correspondem a misturas de dois componentes, em que cada um está na proporção de

50%; o ponto de interseção das medianas corresponde a uma mistura em que cada ingrediente contribui com 1/3.

Algumas propriedades atrativas do arranjo simplex  $\{q, m\}$  são:

- a rede consiste de um arranjo simétrico e uniforme dos pontos sobre o simplex, e assim, é dada igual segurança para cada componente do sistema;

- o arranjo é extremamente simples para montar (determinar as combinações dos componentes) e

- as estimativas dos mínimos quadrados dos coeficientes do modelo de regressão (superfícies de resposta) são facilmente calculadas das médias das observações dos pontos do delineamento.

## **5 – MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo é apresentado o detalhamento relativo aos materiais e métodos utilizados para este trabalho. A matéria-prima é constituída por amostras de argila oriundas de indústrias cerâmicas do Distrito Federal e da Paraíba e os resíduos são materiais provenientes de indústrias do Distrito Federal e de Goiás como o lodo gerado em ETA, a cinza da lenha e a cinza da casca de arroz.

### **5.1 – MATERIAIS UTILIZADOS**

#### **5.1.1 – Argilas (matéria-prima)**

Foram selecionadas e coletadas duas amostras de argilas oriundas do Distrito Federal e da Paraíba. Estas amostras foram identificadas pela abreviação A de argila em ordem numérica.

##### **5.1.1.1 – Argila (A1)**

A argila A1 é proveniente de uma indústria de cerâmica vermelha da cidade de São Sebastião, no Distrito Federal, conforme ilustrado na Figura 5.1. Esta argila foi escolhida por pertencer à maior indústria de cerâmica vermelha da região com a produção em torno de 500.000 blocos cerâmicos por mês. A jazida utilizada localiza-se a cerca de 10 km de distância da indústria.



Figura 5.1 – Argila armazenada na indústria de cerâmica vermelha de São Sebastião/DF

#### 5.1.1.2 – Argila (A2)

A argila A2 é proveniente do Município de Alhandra, Paraíba. A amostra foi fornecida pela Indústria ARMIL MINÉRIOS LTDA, localizada no Município de Parelha, Rio Grande do Norte.

Geologicamente esta argila pertence à Formação Barreiras e apresenta-se na forma de agregados muito duros e densos de difícil desaglomeração manual e de cor creme-clara. Atualmente está sendo usada na Indústria Revestimento Cerâmico para fabricação de pisos.

#### 5.1.2 – Resíduos

Foram selecionadas e coletadas três amostras de resíduos oriundas de indústrias do Distrito Federal e de Goiás. A identificação das amostras foi feita de acordo com as iniciais do resíduo.

### 5.1.2.1 - Cinza de Casca de Arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz foi coletada em uma empresa situada em Aparecida de Goiânia – GO, localizada a aproximadamente 220 km de Brasília. A empresa existe há 26 anos e possui uma produção de 25 toneladas por hora de arroz, capacidade atual de beneficiamento. Com equipamentos de última geração e rigoroso padrão de qualidade, a empresa é referência nacional no ramo de beneficiamento de arroz, atuando no Centro-Oeste, com vários representantes comerciais, detendo praticamente 100% dos pontos de venda da Grande Goiânia, e já disputando o mercado do Distrito Federal, Mato Grosso, Minas Gerais, Tocantins, Pará, Maranhão e Bahia. A Figura 5.2 ilustra a CCA utilizada na pesquisa.

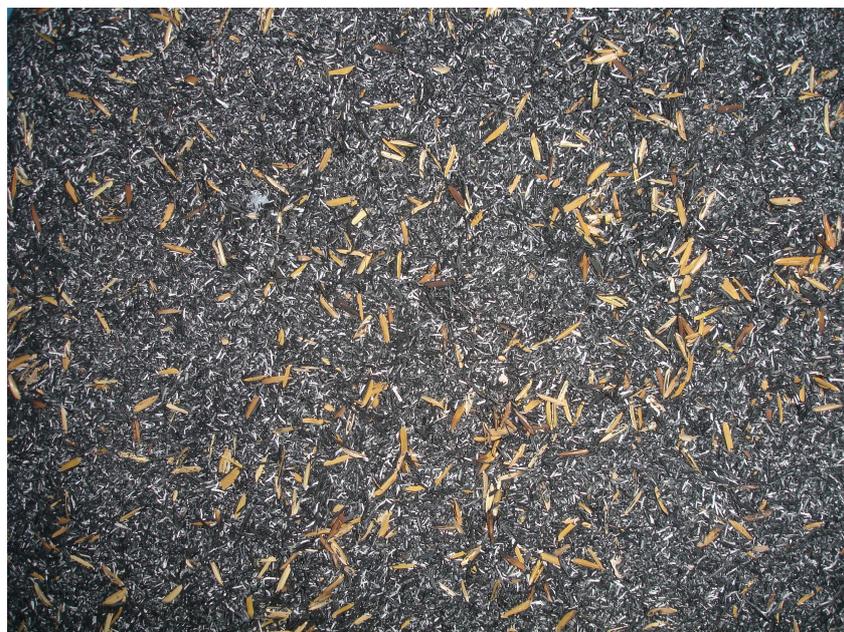


Figura 5.2 – Cinza de casca de arroz utilizada na pesquisa

### 5.1.2.2 – Lodo de ETA

O lodo foi coletado na ETA-Descoberto, sendo a principal Estação de Tratamento de Água do sistema operado pela CAESB, tratando uma vazão média de 3.800 L/s. Inaugurada em 1986, a ETA-Descoberto passou por extensiva reforma finalizada em 1996. É responsável pelo abastecimento de grande parte da população do DF, aproximadamente 1.400.000 habitantes, 66% do total (CAESB, 2009). As localidades

abastecidas pela ETA-Descoberto são: Ceilândia, Taguatinga, Samambaia, Riacho Fundo, Recanto das Emas, Samambaia, Guará, Candangolândia e Gama, podendo ainda complementar o sistema distribuidor Torto/Santa Maria. O índice de atendimento à população com sistema de abastecimento de água é de 99% (CAESB, 2009).

A ETA-Descoberto utiliza sulfato de alumínio como (floculante) coagulante, sendo que em determinadas épocas do ano pode vir a utilizar policloreto de alumínio ou proceder à aplicação de polímero como auxiliar de (floculação) coagulação.

O lodo sedimentado é descarregado para dois poços de acumulação e desidratado em duas centrífugas como ilustrado na Figura 5.3. Após desidratado, o lodo é encaminhado através de rosca transportadora a caçambas de 6 ton. conforme apresentado nas Figuras 5.4a e 5.4b e, posteriormente, descartado em uma cascalheira desativada. Existe, ainda, uma lagoa de lodo como alternativa de descarte para o caso de excesso de produção de lodo, ou em caso de necessidade de paralisações para manutenção dos equipamentos.



Figura 5.3 – Centrífuga da unidade de desidratação de lodo da ETA-Descoberto



(a)

(b)

Figura 5.4. a) Saída do lodo pela rosca transportadora. b) Caçambas com lodo dispostas na ETA-Descoberto

### 5.1.2.3 – Cinza de Lenha

O combustível de maior utilização nas indústrias cerâmicas do Distrito Federal é a lenha, sendo a cinza o resíduo gerado após a sua queima conforme ilustrado na Figura 5.5.



Figura 5.5 – Cinza de lenha de uma indústria cerâmica de Goiás

A cinza de lenha utilizada foi coletada de uma indústria cerâmica da cidade de São Sebastião no Distrito Federal, responsável pela fabricação de cerâmica branca da região.

## **5.2 – MÉTODOS**

A metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa consiste nas etapas descritas a seguir conforme atividades desenvolvidas e ensaios realizados.

### **5.2.1 – Ensaios de caracterização**

A caracterização física das amostras estudadas nesta pesquisa foi efetuada por meio da análise granulométrica por difração de laser (AG) e dos limites de Atterberg. A caracterização mineralógica incluiu: análise química (AQ); difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica (ATG) e análise térmica diferencial (ATD). Para a caracterização ambiental realizou-se os ensaios de solubilização e lixiviação de acordo com as normas da ABTN.

A Figura 5.6 apresenta o fluxograma com as etapas dos ensaios de caracterização dos materiais.

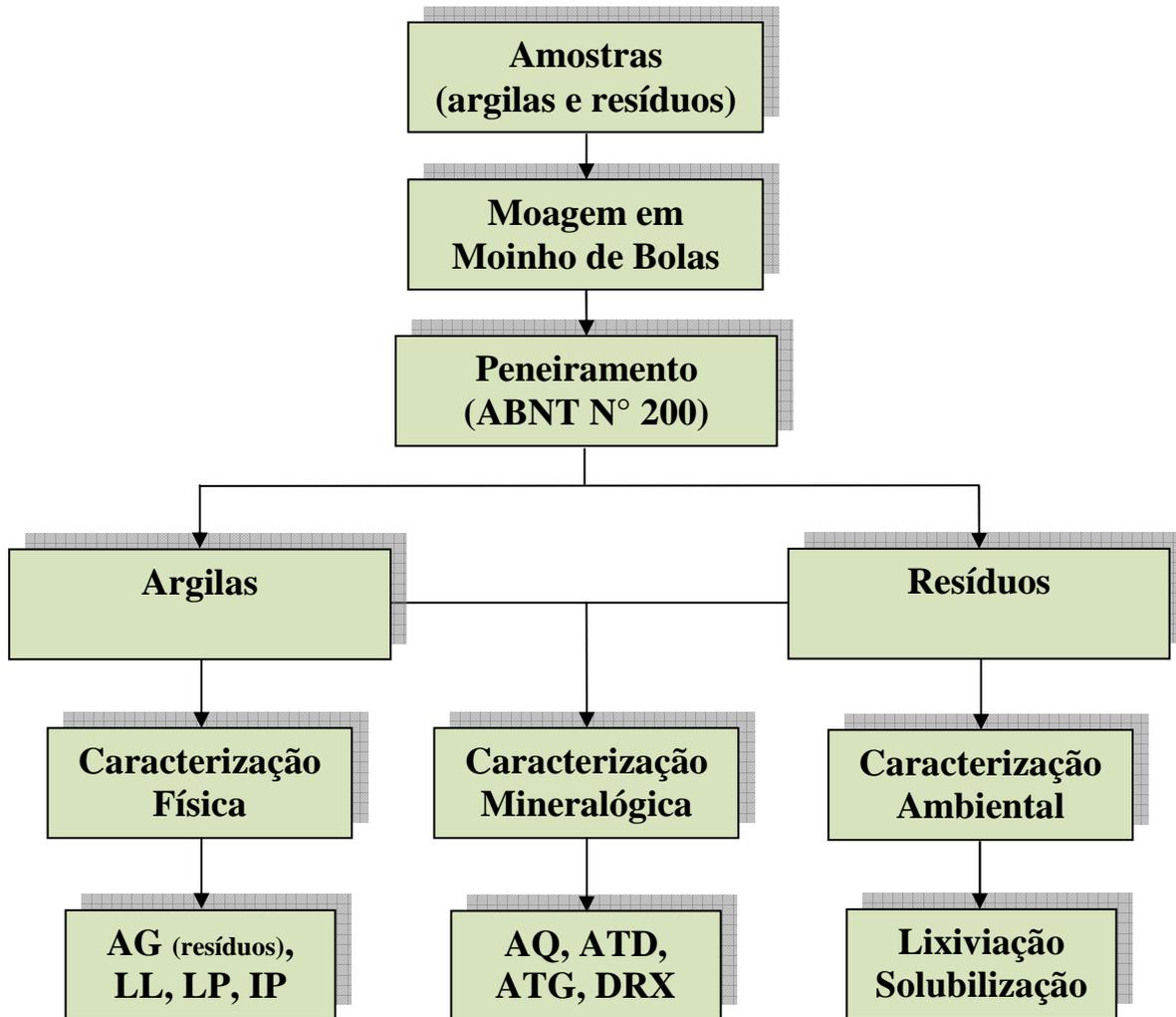


Figura 5.6 – Fluxograma com as etapas dos ensaios de caracterização

### 5.2.1.1 – Caracterização Ambiental

#### 5.2.1.1.1 – Lixiviação de Resíduos

O processo de lixiviação consiste em separar certas substâncias contidas nos resíduos industriais por meio de lavagem ou percolação. Para realização deste ensaio, as amostras de resíduos foram beneficiadas em peneira ABNT N° 200 (0,074mm) e posteriormente submetidas aos ensaios segundo a norma ABNT 10005:2004. A análise química da solução foi realizada em um espectrofotômetro de absorção atômica.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Gestão de Resíduos do Departamento de Engenharia Química da UFCG-PB e na FUNMINERAL.

Os critérios para análise das condições de qualidade da água são:

a) não verificação de efeito tóxico crônico a organismos, de acordo com os critérios estabelecidos pelo órgão ambiental competente, ou, na sua ausência, por instituições nacionais ou internacionais renomadas, comprovado pela realização de ensaio ecotoxicológico padronizado ou outro método cientificamente reconhecido.

b) materiais flutuantes, inclusive espumas não naturais: virtualmente ausentes;

c) óleos e graxas: virtualmente ausentes;

d) substâncias que comuniquem gosto ou odor: virtualmente ausentes;

e) corantes provenientes de fontes antrópicas: virtualmente ausentes;

f) resíduos sólidos objetáveis: virtualmente ausentes;

g) coliformes termotolerantes: para o uso de recreação.

#### 5.2.1.1.2 – Solubilização de Resíduos

O processo de solubilização consiste na operação de adicionar água deionizada ou destilada ao resíduo, seguindo-se uma agitação e filtragem. Para a realização deste ensaio as amostras de resíduos foram beneficiadas em peneira ABNT N° 200 (0,074mm) e posteriormente submetidas aos ensaios segundo a norma ABNT 10006:2004. A análise química da solução foi realizada em um espectrofotômetro de absorção atômica.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Gestão de Resíduos do Departamento de Engenharia Química da UFCG-PB e na FUNMINERAL.

## 5.2.1.2 – Caracterização Física

### 5.2.1.2.1 - Análise granulométrica por difração de laser

A análise granulométrica por difração de laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associado com um processo de medida óptica através de difração de laser. Neste método, é combinada a relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho de partículas.

Para realização desta caracterização, os resíduos foram passados em peneira ABNT n<sup>o</sup> 80 (0,180mm) e dispersos em água destilada em agitador Hamilton Beach N5000 a velocidade de 17.000 rpm por 20 min. Foi utilizado hexametáfosfato de sódio como agente dispersante. A dispersão foi deixada em repouso por 24h e, em seguida, o material foi agitado por 5 min em agitador Hamilton Beach N5000 e colocado em um equipamento CILAS modelo 1064 como ilustrado na Figura 5.7, em modo úmido, até atingir a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, PB.



Figura 5.7 – Granulômetro à laser CILAS 1064

#### 5.2.1.2.2 – Limites de Atterberg

O ponto ótimo de trabalhabilidade da massa para conformação é medido pela plasticidade.

A determinação dos limites de Atterberg representados pelos Limites de Plasticidade (LP) e de Liquidez (LL) são normatizados pela ABNT NBR 7180:1984 e ABNT NBR 6459:1984, respectivamente. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

Os resultados são a média em três determinações com desvio padrão relativo máximo de 5% e são apresentados em % com aproximação de duas casas decimais.

#### **5.2.1.3 – Caracterização Mineralógica**

##### 5.2.1.3.1 – Preparação das Amostras

As amostras foram secas em estufa a 110 °C por 24 horas até massa constante, em seguida desagregadas em almofariz de porcelana e peneiradas por via seca em peneira ABNT N° 200 (abertura de 0,74mm), e posteriormente acondicionadas em sacos plásticos.

##### 5.2.1.3.2 – Análise química

A análise química fornece dados fundamentais de grande utilidade industrial e científica, apesar de não permitir uma avaliação completa da composição mineralógica e das propriedades físico-químicas.

Neste trabalho foram analisadas as determinações de: perda ao fogo, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O e resíduos insolúveis.

A análise química dos resíduos foi determinada por Espectrofotometria de Fluorescência de Raios X, em equipamento SHIMAZDU EDX 720, como apresentado na Figura 5.8, para determinação da composição química semi-quantitativa.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, PB.



Figura 5.8 – Espectrofotômetro de fluorescência de raios X SHIMAZDU EDX 720

#### 5.2.1.3.3 – Difração de raios X

As amostras de argilas e resíduos foram beneficiados em moinho de bolas e passados em peneira ABNT nº 200 (0,074mm) e acondicionada em porta amostra de alumínio para análise por difração de raios X, em equipamento XRD 6000 da SHIMADZU, como apresentado na Figura 5.9. A radiação utilizada foi  $K\alpha$  do Cu (40kV/30mA); Utilizou-se o procedimento de tempo fixo, com passo de  $0,02^\circ$  e tempo de leitura de 0,6s. A interpretação foi efetuada por comparação com padrões contidos no PDF 02 (ICDD, 2003).

As análises de difração de raios X foram realizadas no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – PB.



Figura 5.9 – Difratorômetro de raios X SHIMADZU XRD6000

#### 5.2.1.3.4 – Análises térmicas

As análises termogravimétrica (ATG) e termodiferencial (ATD) são úteis em processos de produção cerâmica para indicar as faixas de temperaturas onde ocorrem as perdas de massas e as temperaturas em que ocorrem transformações endotérmicas e exotérmicas.

As curvas térmicas foram obtidas através de um sistema de Análises Térmicas Modelo RB-3000 da BP Engenharia aquecimento 12,5°C/min como apresentado na Figura 5.10. A temperatura máxima para ambos os casos foi de 1000 °C e o padrão utilizado na ATD foi óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) calcinado.



Figura 5.10 – Analisador térmico RB 3000

## 5.2.2 – Ensaio Tecnológicos

Os ensaios tecnológicos foram executados em escala de laboratório segundo a metodologia proposta por Souza Santos (1992). As amostras estudadas nesta pesquisa foram submetidas aos ensaios tecnológicos preliminares e ensaios tecnológicos completos visando a sua utilização em cerâmica vermelha, de acordo com a sistemática proposta por Souza Santos (1992) e Normas da ABNT. A sequência de ensaios é apresentada na Figura 5.11.

### 5.2.2.1 – Preparação das Amostras

As amostras foram secas em estufa a 110 °C por 24 horas, homogêneas e posteriormente colocadas no moinho de galgas, beneficiadas em peneira ABNT N° 80 (0,018mm). Esta peneira corresponde a granulometria usual de prensagem industrial de massas cerâmicas semi-secas (Souza Santos, 1992). Em seguida as amostras foram armazenadas em sacos plásticos.

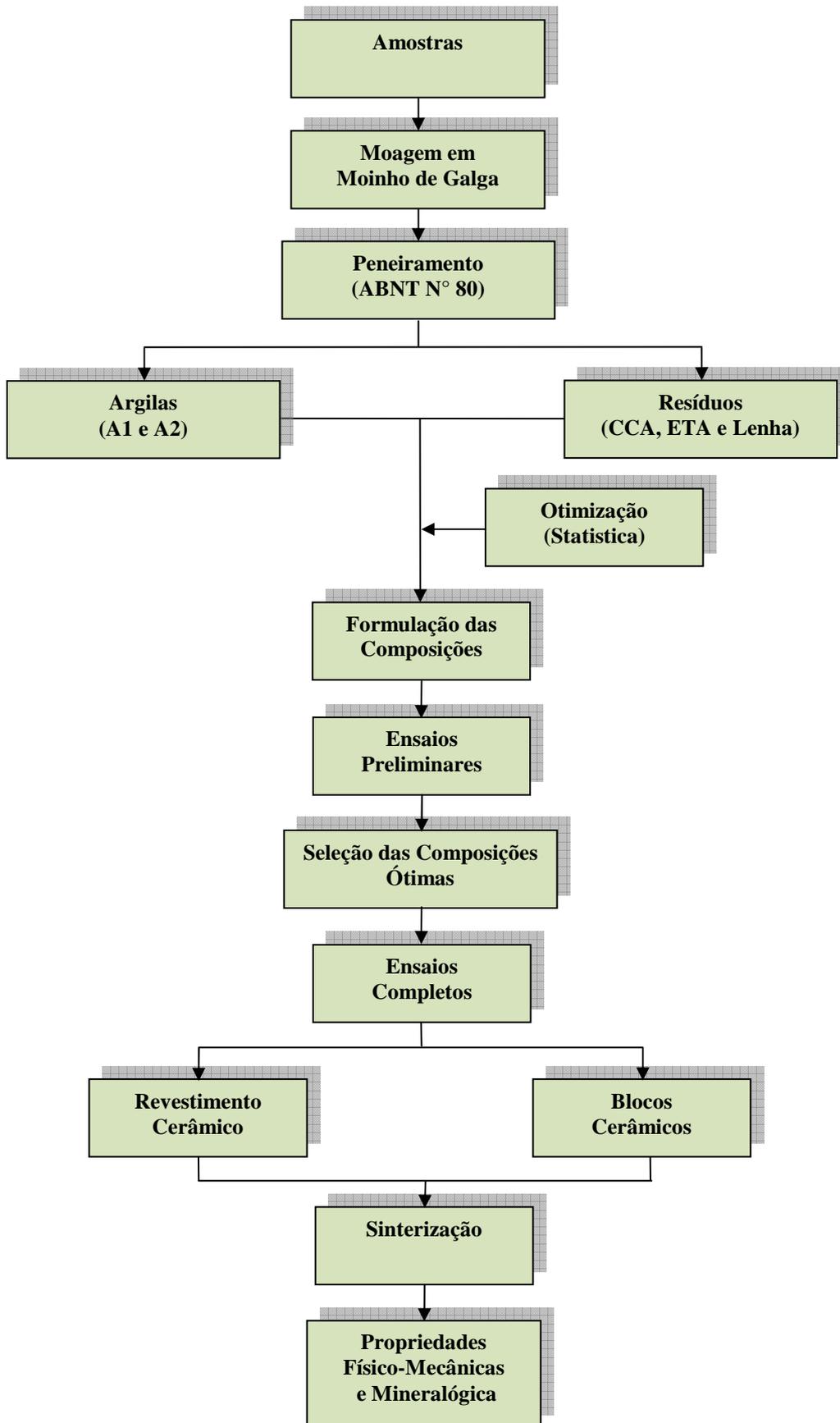


Figura 5.11 – Fluxograma das etapas de ensaios dos materiais para aplicação em blocos e revestimentos cerâmicos

### **5.2.2.2 – Formulação das Composições**

As composições foram formuladas utilizando-se planejamento experimental através da metodologia de delineamento de misturas. O desenvolvimento das composições A e B foi efetuado com um delineamento simplex simples com ponto central aumentado com ponto central (o aumentado significa que além do ponto central, tem mais pontos), utilizando-se restrições no teor de matérias-primas para obtenção de blocos cerâmicos.

As composições foram formuladas com a matéria-prima combinada com um ou dois resíduos. Para a composição A: argila, lodo de ETA e CCA. E para a composição B: argila, cinza da lenha e CCA. Pretende-se assim, avaliar a viabilidade das misturas dessas matérias-primas para a produção de produtos cerâmicos. Foram estabelecidos limites inferiores e superiores de 50 e 100% de argila, respectivamente e limites inferiores e superiores de 0 e 50 % de resíduos, respectivamente.

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 estão apresentadas as composições (A) e (B) obtidas, tanto em termos dos componentes originais, como dos pseudocomponentes, das formulações para a produção de blocos cerâmicos. Os ensaios foram realizados em três replicatas.

Tabela 5.1 – Composições A obtidas através do planejamento em rede simplex {3,2} com ponto central para as formulações

Formulações	Proporção (%)		
	Argila	ETA	CCA
1	100,00	0,00	0,00
2	50,00	50,00	0,00
3	50,00	0,00	50,00
4	75,00	25,00	0,00
5	75,00	0,00	25,00
6	50,00	25,00	25,00
7	66,67	16,67	16,67
8	83,33	8,33	8,33
9	58,33	33,33	8,33
10	58,33	8,33	33,33

Tabela 5.2 – Composições B obtidas através do planejamento em rede simplex {3,2} com ponto central para as formulações

Formulações	Proporção (%)		
	Argila	Lenha	CCA
1	100,00	0,00	0,00
2	50,00	50,00	0,00
3	50,00	0,00	50,00
4	75,00	25,00	0,00
5	75,00	0,00	25,00
6	50,00	25,00	25,00
7	66,67	16,67	16,67
8	83,33	8,33	8,33
9	58,33	33,33	8,33
10	58,33	8,33	33,33

As Figuras 5.12 e 5.13 ilustram esse trapézio e as composições formuladas presentes nas Tabelas 5.1 e 5.2 a seguir.

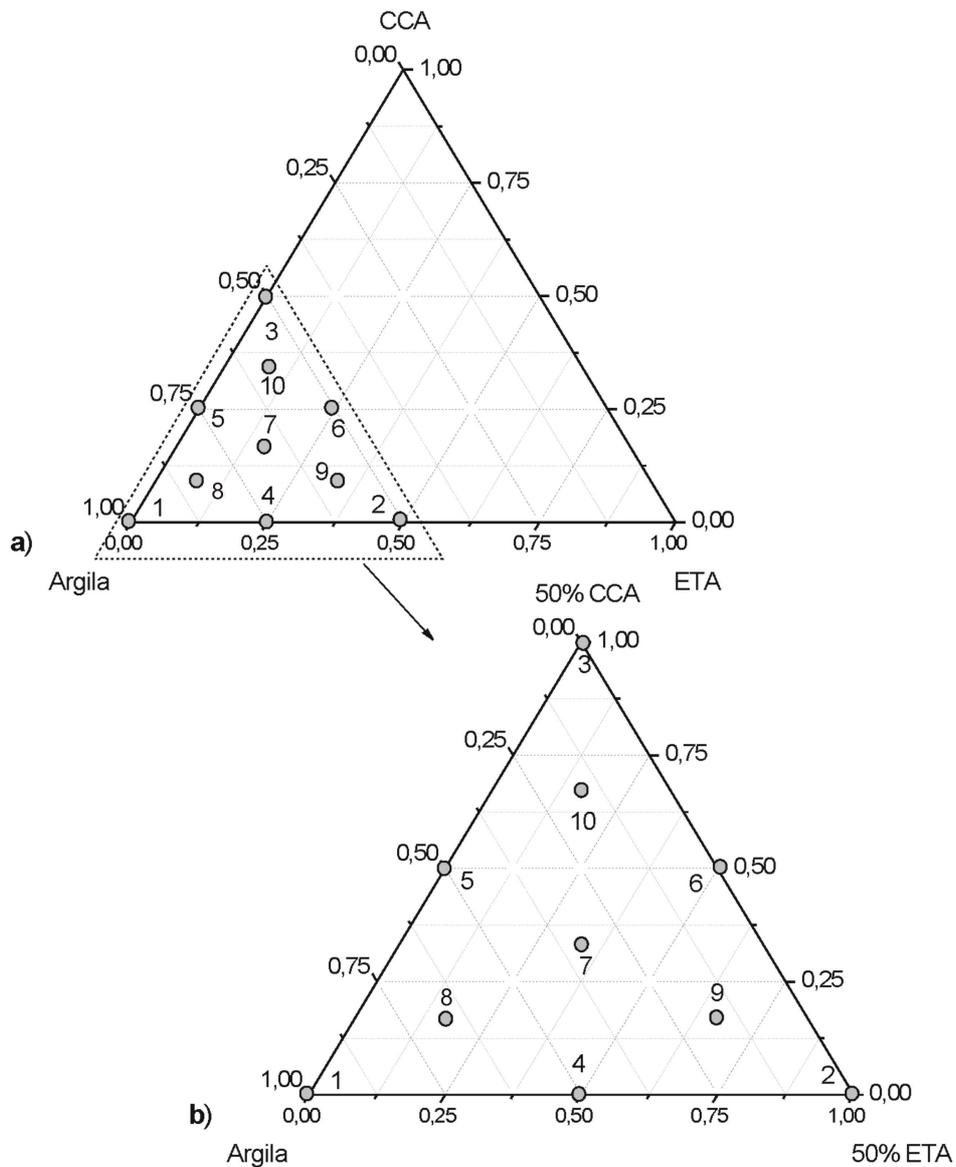


Figura 5.12. a) Esquema das formulações no diagrama ternário. b) Composições A obtidas através do planejamento em rede simplex  $\{3,2\}$  com ponto central para as formulações

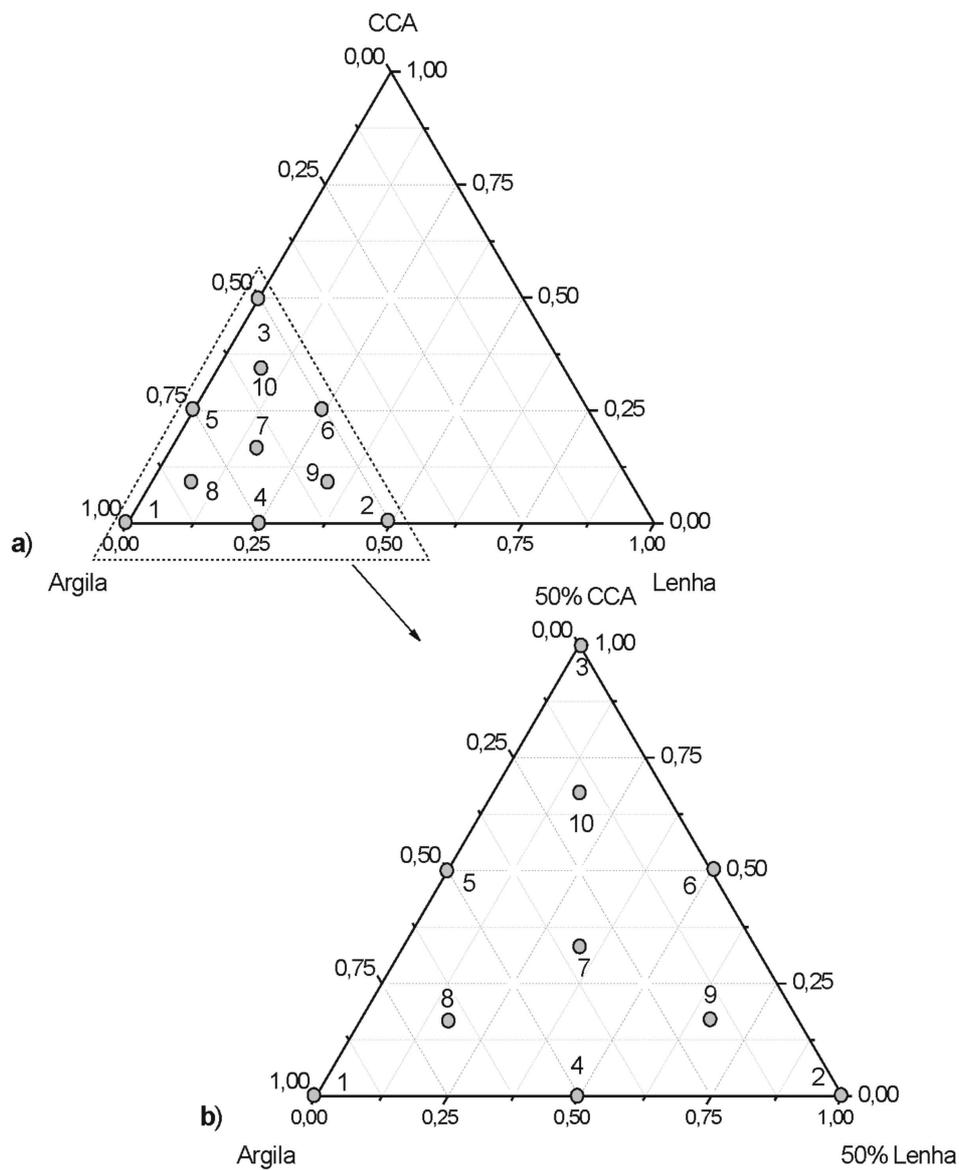


Figura 5.13. a) Esquema das formulações no diagrama ternário. b) Composições B obtidas através do planejamento em rede simplex {3,2} com ponto central para as formulações

### 5.2.2.3 – Estudo Estatístico

Na representação dos ajustes de valores de resposta para a composição A (AA, MRF e RQ) utilizou-se os modelos linear (Equação A), quadrático (B), cúbico especial (Equação C) e cúbico (D) em termos dos componentes A, G e C;

$$Y(A,G,C) = b_1A + b_2G + b_3C \quad (A)$$

$$Y(A,G,C) = b_1A + b_2G + b_3C + b_4AG + b_5AC + b_6GC \quad (B)$$

$$Y(A,G,C) = b_1A + b_2G + b_3C + b_4AG + b_5AC + b_6GC + b_7AGC \quad (C)$$

$$Y(A,G,C) = b_1A + b_2G + b_3C + b_4AG + b_5AC + b_6GC + b_7AG(A-G) + b_8AC(A-C) + b_9GC(G-C) + b_{10}AGC \quad (D)$$

sendo Y é a estimativa da resposta AA, MRF ou RQ e  $b_x$  os coeficientes da equação e A, G e C as proporções das matérias-primas presentes nas formulações, argila, ETA e CCA respectivamente.

Na representação dos ajustes de valores de resposta para a composição B (AA, MRF e RQ) utilizou-se os modelos linear (Equação A), quadrático (B), cúbico especial (Equação C) e cúbico (D) em termos dos componentes A, G e C;

$$Y(A,G,C) = b_1A + b_2G + b_3C \quad (A)$$

$$Y(A,G,C) = b_1A + b_2G + b_3C + b_4AG + b_5AC + b_6GC \quad (B)$$

$$Y(A,G,C) = b_1A + b_2G + b_3C + b_4AG + b_5AC + b_6GC + b_7AGC \quad (C)$$

$$Y(A,G,C) = b_1A + b_2G + b_3C + b_4AG + b_5AC + b_6GC + b_7AG(A-G) + b_8AC(A-C) + b_9GC(G-C) + b_{10}AGC \quad (D)$$

sendo Y é a estimativa da resposta AA, MRF ou RQ e  $b_x$  os coeficientes da equação e A, G e C as proporções das matérias-primas presentes nas formulações, argila, lenha e CCA respectivamente.

#### 5.2.2.4 – Ensaios Preliminares

Os ensaios tecnológicos preliminares foram realizados segundo a sistemática proposta por Souza Santos (1992). Os corpos-de-prova foram confeccionados na forma de lâminas prismáticas com dimensões de 6,0 cm x 2,0 cm x 0,5 cm apresentado na Figura 5.14a por prensagem uniaxial em prensa hidráulica SCHWING SIWA a 27,0 MPa apresentado na Figura 5.14b.

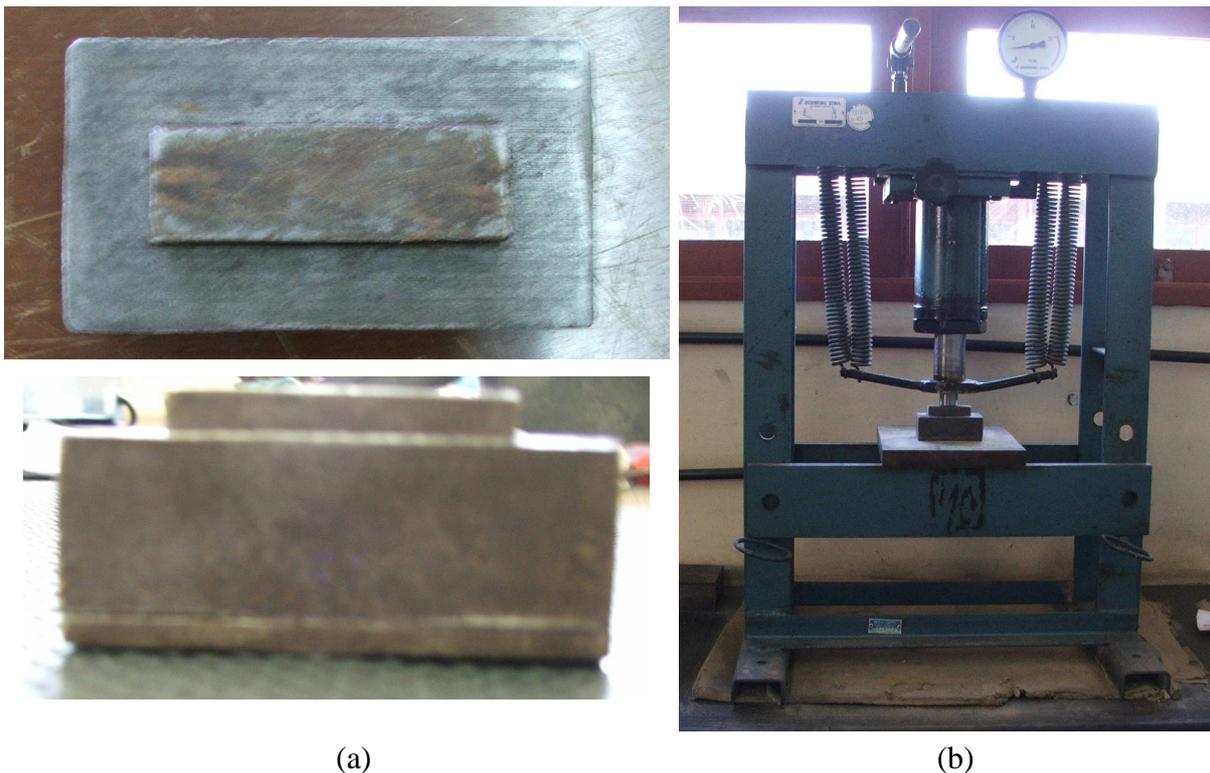


Figura 5.14. a) Molde para a confecção de corpos-de-prova. b) Prensa hidráulica para a conformação de corpos-de-prova

Na etapa seguinte, os corpos-de-prova foram secos em estufa a 110 °C pelo período de 24 horas e posteriormente sinterizados em Forno Maitec FE 50rp apresentado na Figura 5.15, em ciclos de aquecimento de 8 horas com patamar de queima de 2 horas nas temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C. O resfriamento foi realizado naturalmente durante a noite. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica da Universidade Federal de Campina Grande – PB.



Figura 5.15 – Forno utilizado para a queima dos corpos-de-prova. a) Vista frontal. b) Vista interna

#### 5.2.2.5 – Ensaios Completos para Revestimento Cerâmico

Os ensaios tecnológicos completos para revestimento cerâmico foram realizados segundo a sistemática proposta pela American Ceramic Society citada por Souza Santos (1992). Os corpos-de-prova foram confeccionados com dimensões de 6,0 cm x 2,0 cm x 0,5 cm, prensados em prensa hidráulica SCHWING SIWA. Na etapa seguinte todos os corpos-de-prova foram secos em estufa a 110 °C por um período de 24 horas e posteriormente sinterizados nas temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min com patamar de queima de 30 minutos. O resfriamento foi realizado naturalmente durante a noite. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica da Universidade Federal de Campina Grande – PB.

### 5.2.2.6 – Ensaios Completos para Blocos Cerâmicos

Os ensaios tecnológicos completos foram realizados segundo a sistemática proposta pela American Ceramic Society citada por Souza Santos (1992). Os corpos-de-prova foram confeccionados com dimensões de 10,0 cm x 2,0 cm x 1,0 cm, extrudados em uma maromba de laboratório Modelo 51 da Marca VERDÉS ilustrado na Figura 5.16a e 5.16b. Na etapa seguinte todos os corpos-de-prova foram secos em estufa a 110 °C por um período de 24 horas e posteriormente sinterizados nas temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C em ciclos de aquecimento de 8 horas com patamar de queima de 2 horas. O resfriamento foi realizado naturalmente durante a noite. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica da Universidade Federal de Campina Grande – PB.



Figura 5.16 – Maromba de laboratório Modelo 51 da Marca VERDÉS. a) Vista geral. b) Vista com detalhe da extrusão

### 5.2.2.7 – Propriedades físicas

Após a queima, os corpos-de-prova foram submetidos à determinação das propriedades físicas: absorção de água (AA), retração linear de queima (RQ), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA). Os resultados são as médias aritméticas das três replicatas com os respectivos desvios padrões. Em seguida, os valores foram comparados com os resultados preconizados por Souza Santos (1992) e normas da ABNT.

### 5.2.2.8 – Propriedades Mecânicas

O módulo de ruptura à flexão (MRF) refere-se à resistência do material à ruptura por flexão simples pelo método dos três pontos. Os ensaios de resistência à flexão foram realizados na máquina universal de ensaios AG-X50 SHIMADZU apresentada na Figura 5.17. Os resultados são as médias aritméticas das três replicatas com os respectivos desvios padrões. As propriedades mecânicas foram determinadas no Laboratório de Cerâmica da UFCG – PB.



Figura 5.17 – Máquina universal de ensaios SHIMADZU AG-X50

## **6 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios de massas incorporadas com resíduos provenientes da CCA, do lodo de ETA e da cinza da lenha para a utilização em cerâmica vermelha na produção de blocos e revestimentos cerâmicos. Na primeira etapa deste trabalho foi feita a análise ambiental dos resíduos com os ensaios de solubilização e lixiviação. Na segunda etapa foi realizada a caracterização física incluindo a análise granulométrica e a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade e índices de plasticidade das argilas. Para a terceira etapa foi realizada a análise mineralógica incluindo a análise química, análises térmicas e difratometria de raios X. E finalmente para a quarta etapa foram realizados os ensaios completos com moldagem por prensagem e por extrusão de acordo com as normas atuais.

### **6.1 – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL**

#### **6.1.1 – Lixiviação de resíduos**

Na Tabela 6.1 apresentam-se os resultados do ensaio de lixiviação dos resíduos estudados de acordo com as normas da ABNT NBR 10.004 e NBR 10.005 (2004).

Observando-se os valores da Tabela 6.1, pode-se concluir que os resíduos não são perigosos, ou seja, não pertencem à Classe I. Para saber a classificação dos mesmos foi realizado o ensaio de solubilização.

Tabela 6.1 – Resultados dos ensaios de lixiviação dos resíduos

Parâmetros Analisados (mg/L)	Concentração no Lixiviado (mg/L)			NBR 10.004 Limite Máximo (mg/L)
	CCA	ETA	Lenha	
Níquel	< 0,10	< 0,10	0,12	25 <sup>3</sup>
Ferro	0,30	0,21	0,18	30 <sup>2</sup>
Alumínio	2,34	< 0,10	< 0,10	20 <sup>2</sup>
Cobre	< 0,10	< 0,10	0,11	200 <sup>2</sup>
Cobalto	< 0,10	< 0,10	0,39	5 <sup>3</sup>
Cromo	< 0,10	< 0,10	0,39	5,0 <sup>1</sup>
Cádmio	< 0,05	0,22	< 0,05	0,5 <sup>1</sup>
Zinco	< 0,10	0,19	< 0,10	500 <sup>2</sup>
Manganês	< 0,10	3,91	< 0,10	10 <sup>2</sup>
Sódio	67,1	652	229	20000 <sup>2</sup>
Chumbo	< 0,10	< 0,10	0,21	1,0 <sup>1</sup>
Bário	< 1,00	-	< 1,00	70,0 <sup>1</sup>

Fonte: ABNT NBR 10.004 (2004)<sup>1</sup>; Portaria 518 MS – Padrões de Potabilidade (valor multiplicado por 100)<sup>2</sup>; Resolução 357 CONAMA, 2005 (valor multiplicado por 100)<sup>3</sup>

### 6.1.2 – Solubilização de resíduos

Na Tabela 6.2 apresentam-se os resultados do ensaio de solubilização dos resíduos de acordo com os métodos das normas da ABNT NBR 10004 e NBR 10006 (2004).

Observando-se os valores obtidos na Tabela 6.2, verifica-se que a CCA foi classificado como Classe II A (Não Inerte). Os valores de sódio e manganês ficaram acima do limite máximo. O lodo ETA foi classificado como Classe II A (Não Inerte), pois os valores de ferro, cromo, cádmio, manganês e chumbo estão acima do limite máximo. A cinza de lenha foi classificada como Classe II A (Não Inerte). Os valores de cromo, cádmio e chumbo ficaram acima do limite máximo.

Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios de solubilização dos resíduos

Parâmetros Analisados (mg/L)	Concentração no Solubilizado (mg/L)			NBR 10.004 Limite Máximo (mg/L)
	CCA	ETA	Lenha	
Níquel	< 0,10	< 0,10	< 0,10	-
Ferro	< 0,10	1,92	< 0,10	0,3*
Alumínio	< 0,10	< 0,10	< 0,10	0,2*
Cobre	< 0,10	< 0,10	< 0,10	2,0*
Cobalto	< 0,10	< 0,10	< 0,10	-
Cromo	< 0,10	< 0,10	0,16	0,05*
Cádmio	< 0,05	0,05	< 0,05	0,005*
Zinco	0,50	0,14	< 0,10	5,0*
Manganês	3,34	1,50	< 0,10	0,1
Sódio	576	67,0	99,1	200,0*
Chumbo	< 0,10	< 0,10	0,11	0,01*
Bário	-	< 1,00	-	0,7*

Fonte: \* ABNT NBR 10.004 (2004).

## 6.2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

### 6.2.1 – Granulometria a Laser dos Materiais

Na Tabela 6.3 é apresentada a distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas estudadas: A1, A2, lodo de ETA, cinza da lenha e CCA.

Tabela 6.3 – Distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas estudadas

Amostra	Argila ( $<2\mu\text{m}$ )	Silte ( $2\leq X < 65\mu\text{m}$ )	Areia ( $65\leq X < 2000\mu\text{m}$ )	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )
A1	24,06	75,37	0,57	11,31
A2	23,20	76,80	0,00	5,07
CCA	0,82	75,21	23,97	47,59
Lodo de ETA	5,50	52,79	41,71	62,33
Cinza de lenha	8,44	87,49	4,07	25,62

Analisando os valores contidos na Tabela 6.3, verifica-se que as matérias-primas estudadas apresentaram comportamento, do ponto vista granulométrico, completamente distinto. A distribuição granulométrica do resíduo de CCA é mais grosseira do que a argila e os outros tipos de resíduos por apresentar apenas 0,82 % abaixo de 2  $\mu\text{m}$ . Em relação ao diâmetro médio de partícula verifica-se que o resíduo do lodo ETA apresenta maior tamanho médio de partículas (62,33  $\mu\text{m}$ ), enquanto a A2 apresenta um menor diâmetro (5,07  $\mu\text{m}$ ). Este fato pode estar relacionado ao maior teor do argilomineral caulinita presente em A2. Em relação à norma da ABNT NBR 7181:1984, verifica-se que a A1 é composta por 24,06% (fração argila), 75,37% (silte) e 0,57% (areia). A distribuição granulométrica de A2 é mais fina do que A1 por não apresentar partículas acima de 65 $\mu\text{m}$ , e é composta por 23,20% (fração argila), e 76,80% (silte). Comparando os valores de distribuição granulométrica das argilas com os resultados obtidos e recomendados por VIEIRA et al. (2000) para cerâmica vermelha, verifica-se que são similares.

A distribuição do tamanho de partículas da argila A1 empregada na pesquisa é apresentada na Figura 6.1.

Analisando a curva de distribuição de tamanho de partículas apresentada na Figura 6.1, verifica-se que A1 possui uma larga faixa de distribuição de tamanho de partículas, com comportamento entre o mono e bi-modal, com diâmetro variando de 1 $\mu$ m a 100 $\mu$ m, sendo  $D_{10}$  de 0,75  $\mu$ m,  $D_{50}$  6,74  $\mu$ m e  $D_{90}$  de 28,08  $\mu$ m..

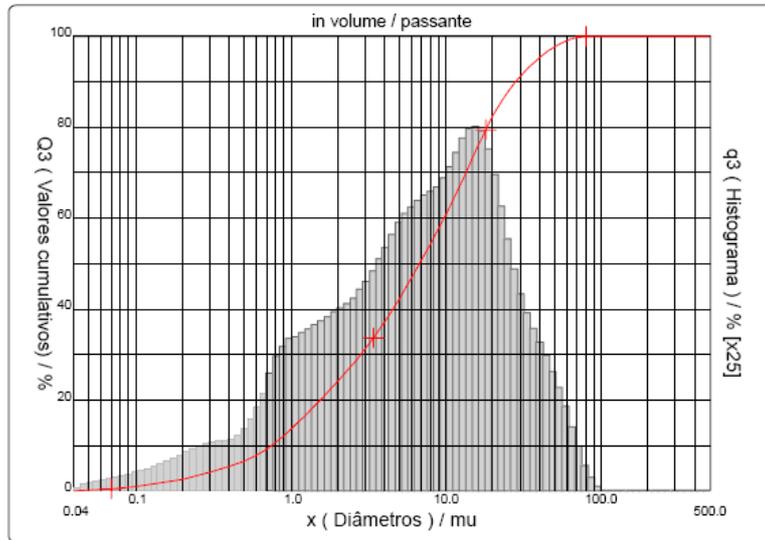


Figura 6.1 – Distribuição do tamanho de partículas de A1

A distribuição do tamanho de partículas de A2 empregada na pesquisa é apresentada na Figura 6.2.

Analisando a curva de distribuição de tamanho de partículas apresentada na Figura 6.2, verifica-se que A2 possui uma estreita faixa de distribuição de tamanho de partículas, com comportamento bi-modal bem definido, com diâmetro variando de 0,1  $\mu$ m a 0,4  $\mu$ m para primeira faixa e de 1 $\mu$ m a 30 $\mu$ m, sendo  $D_{10}$  de 1,07  $\mu$ m,  $D_{50}$  3,89  $\mu$ m e  $D_{90}$  de 10,83  $\mu$ m.

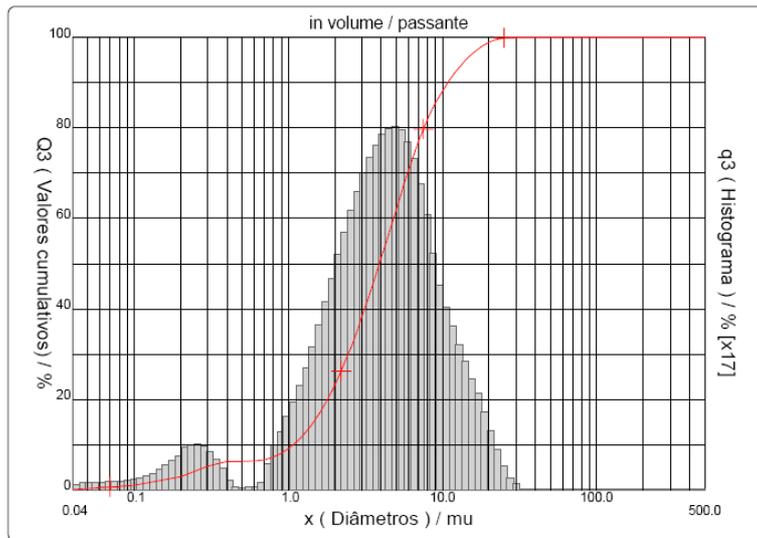


Figura 6.2 – Distribuição do tamanho de partículas de A2

A distribuição do tamanho de partículas da CCA empregada na pesquisa é apresentada na Figura 6.3.

Analisando a curva de distribuição de tamanho de partículas apresentada na Figura 6.3, verifica-se que o resíduo de CCA apresenta uma estreita distribuição de tamanho de partículas, com comportamento mono-modal bem definido, com diâmetro variando de 10  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ , sendo  $D_{10}$  de 14,59  $\mu\text{m}$ ,  $D_{50}$  de 45,67  $\mu\text{m}$  e  $D_{90}$  de 82,19  $\mu\text{m}$ .

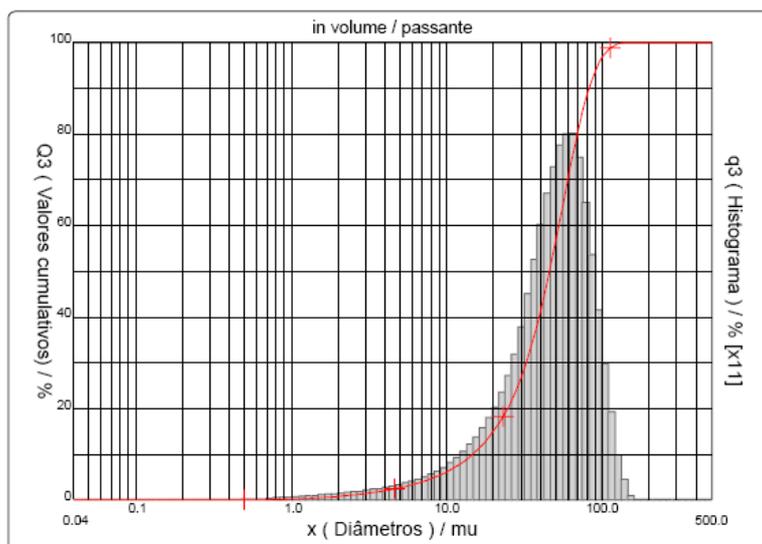


Figura 6.3 – Distribuição do tamanho de partículas da CCA

A distribuição do tamanho de partículas do lodo de ETA empregada na pesquisa é apresentada na Figura 6.4.

Analisando a curva de distribuição de tamanho de partículas Figura 6.4, verifica-se que o resíduo de lodo da ETA apresenta uma larga distribuição de tamanho de partículas com comportamento bi-modal (em verdade é tri-modal, mas a primeira moda é praticamente desprezível devido a sua pequena intensidade), com diâmetro variando de  $1\mu\text{m}$  a  $10\mu\text{m}$  para primeira faixa e de  $10\mu\text{m}$  a  $300\mu\text{m}$  para segunda faixa, sendo  $D_{10}$  de  $4,17\mu\text{m}$ ,  $D_{50}$  de  $53,19\mu\text{m}$  e  $D_{90}$  de  $130,62\mu\text{m}$ .

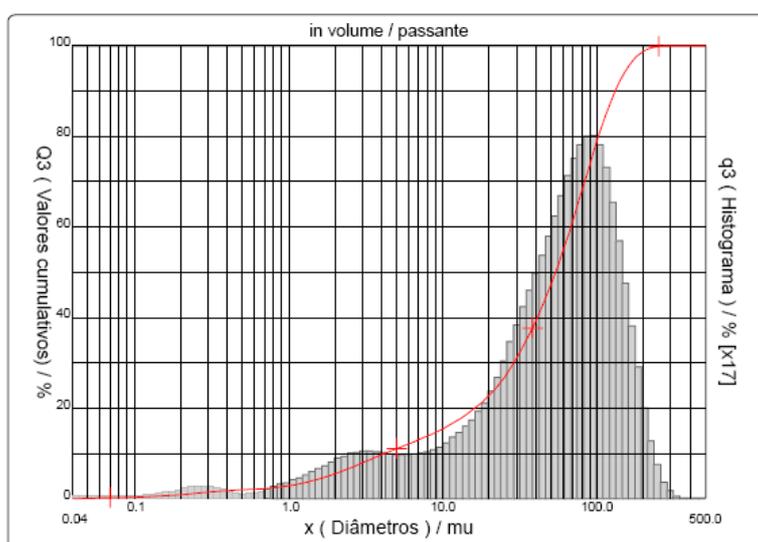


Figura 6.4 – Distribuição do tamanho de partículas do lodo de ETA

A distribuição do tamanho de partículas da cinza de lenha empregada na pesquisa é apresentada na Figura 6.5.

Analisando a curva de distribuição de tamanho de partículas Figura 6.5, verifica-se que o resíduo de cinza de lenha apresenta uma faixa de tamanho de partículas larga de comportamento bi-modal, com diâmetro variando de  $0,1\mu\text{m}$  a  $1\mu\text{m}$  para primeira faixa e de  $1\mu\text{m}$  a  $112\mu\text{m}$  para segunda faixa, sendo  $D_{10}$  de  $2,58\mu\text{m}$ ,  $D_{50}$   $22,38\mu\text{m}$  e  $D_{90}$  de  $53,35\mu\text{m}$ .

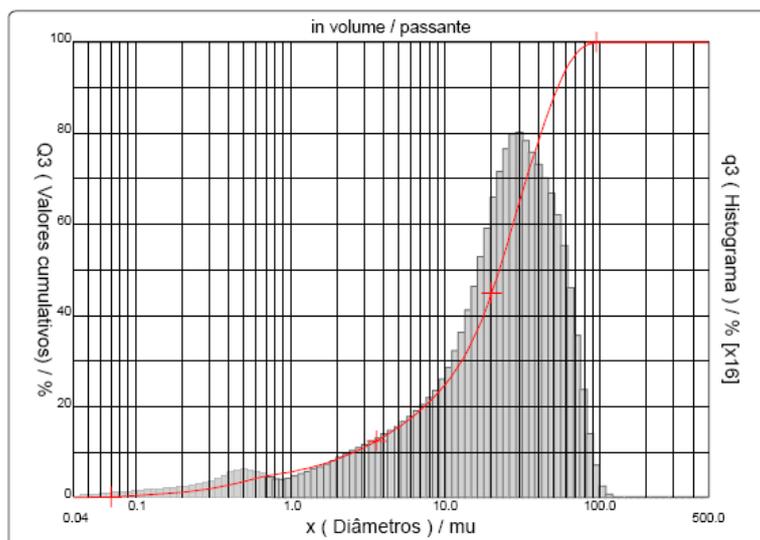


Figura 6.5 – Distribuição do tamanho de partículas da cinza de lenha

### 6.2.2 – Limites de Atterberg das Argilas

A Tabela 6.4 apresenta os resultados dos limites de liquidez, plasticidade e índices de plasticidade das argilas estudadas.

Tabela 6.4 – Limites de Atterberg das amostras de argilas A1 e A2

Argilas	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
A1	37,1	21,6	15,5
A2	48,6	27,0	21,6

Observando-se os resultados contidos na Tabela 6.4 verifica-se que os valores de limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) variaram de 37,1 a 48,6% e de 21,6 a 27,0%, respectivamente, enquanto que o índice de plasticidade (IP) situou-se entre 15,5 a 21,6%. Comparando esses valores com os determinados por Souza Santos (1992) e Vieira et al. (2000), verifica-se que os valores obtidos estão dentro dos intervalos observados para cerâmica vermelha, 30 a 60% para o LL, 15 a 30% para o LP e 10 a 30% para o IP. E de acordo com a classificação em função do índice de plasticidade definida por Caputo (1988), as argilas A1 e A2 são classificadas como altamente plásticas por possuir  $IP > 15\%$ .

Com base no limite de plasticidade verifica-se que A1 é menos plástica que A2. Essas argilas apresentam distribuições granulométricas distintas, assim a diferença de plasticidade provavelmente, está associada a mineralogia ou teor de matéria orgânica presente.

### 6.3 – CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

#### 6.3.1 – Análise Química dos Materiais

Na Tabela 6.5 encontram-se os resultados obtidos da caracterização química de A1 e A2, do lodo de ETA, da cinza da lenha e da CCA.

Tabela 6.5 – Análise química dos materiais em estudo

Porcentagem (em massa)	Amostras				
	A-01	A-02	CCA	ETA	Lenha
PF	16,48	3,29	5,82	30,12	32,37
SiO <sub>2</sub>	49,83	54,06	87,54	21,12	2,29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,35	30,55	0,00	35,96	1,74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,72	6,04	0,11	10,32	0,46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,07	1,75	0,19	3,77
MgO	0,00	1,33	0,00	0,00	7,36
TiO <sub>2</sub>	0,86	0,78	0,00	0,93	0,00
K <sub>2</sub> O	2,56	3,36	3,18	0,89	8,24
SO <sub>3</sub>	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
BaO	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00
CaO	0,00	0,00	1,25	0,26	43,32
MnO	0,03	0,03	0,29	0,03	0,08
CuO	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04	0,00	0,00	0,05	0,00
SrO	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
ZrO <sub>2</sub>	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
Rb <sub>2</sub> O	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Total	99,87	99,97	99,96	99,88	99,63

Analisando a composição química das amostras estudadas, verifica-se que A1 apresenta teores de  $\text{SiO}_2$  (49,83%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (27,35%). A A2 possui teores de  $\text{SiO}_2$  (54,06%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (30,55%). Estas argilas são similares às argilas para cerâmica vermelha (Souza Santos 1992). O teor de ferro inferior a 7% indica que a argila 01 tem baixa coloração vermelha e teores de fundentes, enquanto que a argila 02 apresenta um teor próximo a 7%. O resíduo CCA apresenta elevado teor de  $\text{SiO}_2$  (87,54%), indicando ser de alta refratariedade e redutor de plasticidade da massa. O resíduo da ETA apresenta teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  superior a 10%, indicando coloração vermelha na massa e elevado teor de fundente. O resíduo lenha apresenta teores de  $\text{CaO}$  (43,32%),  $\text{MgO}$  (7,36%) e  $\text{K}_2\text{O}$  (8,24%), indicando ser fundente e formador de poros para temperatura superior a  $1000^\circ\text{C}$ .

### 6.3.2 – Análise Térmica Diferencial e Gravimétrica

Na Figura 6.6 são apresentadas as curvas da análise térmica diferencial de A1.

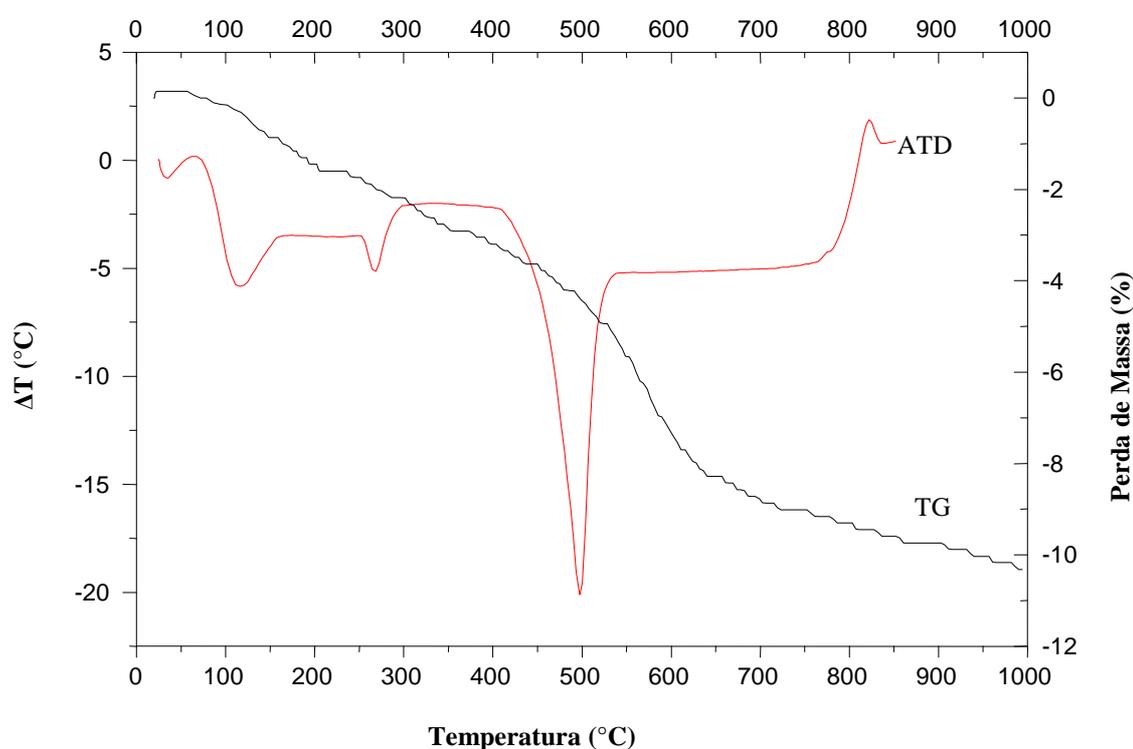


Figura 6.6 - Análise térmica diferencial da A1

Analisando as curvas da Figura 6.6 verifica-se para ATD que A1 utilizada na pesquisa apresenta pico endotérmico a 110 °C correspondente a presença de água livre ou adsorvida; pico endotérmico a 300 °C provavelmente relacionado à decomposição de hidróxido de alumínio; banda exotérmica entre 300 °C e 500 °C correspondente a matéria orgânica; pico endotérmico a 570 °C correspondente dexidroxilação dos argilominerais; pico exotérmico a 980 °C associada à nucleação de mulita. Para curva de TG verifica-se uma perda total de massa de 12% correspondente a perda de água, matéria orgânica, hidróxido de alumínio e hidroxila.

Na Figura 6.7 são apresentadas as curvas da análise térmica diferencial de A2.

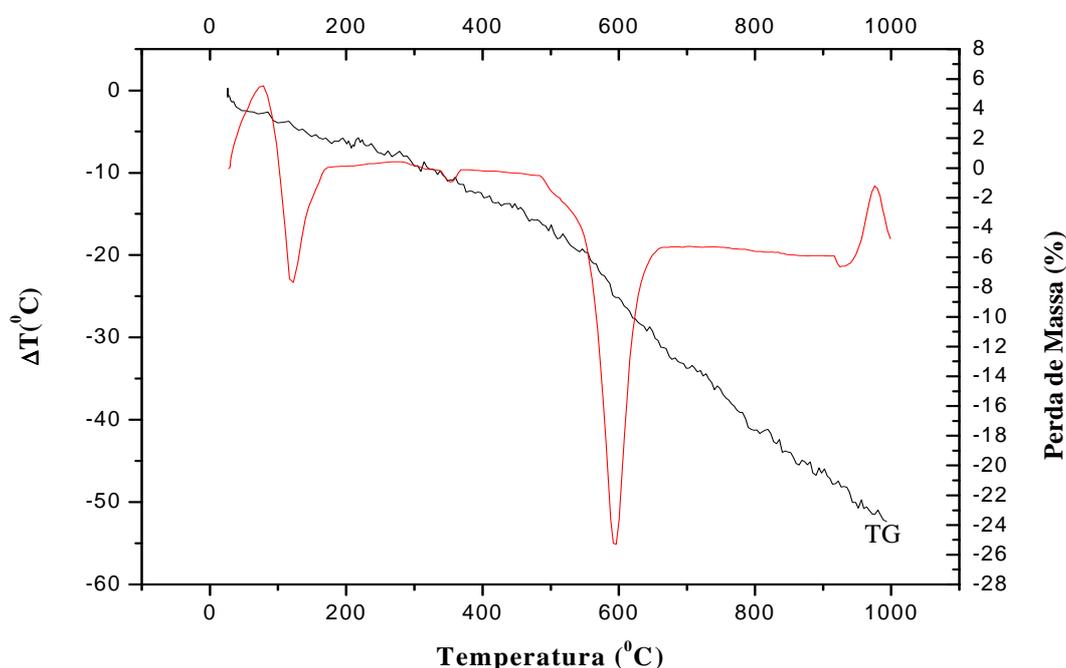


Figura 6.7 - Análise térmica diferencial da A2

Analisando as curvas da Figura 6.7 verifica-se para ATD que A2 utilizada na pesquisa apresenta pico endotérmico a 110 °C correspondente a presença de água livre ou adsorvida; pico endotérmico a 350 °C provavelmente relacionado à decomposição de hidróxido de alumínio; banda exotérmica entre 400 °C e 500 °C correspondente a matéria orgânica; pico endotérmico a 600 °C correspondente dexidroxilação dos argilominerais; pico exotérmico a 980 °C associada à nucleação de mulita. Para curva de TG verifica-se uma perda total de massa inferior a 3% correspondente a perda de água, matéria orgânica, hidróxido de alumínio e hidroxila.

Na Figura 5.8 são apresentadas as curvas da análise térmica diferencial do lodo de ETA.

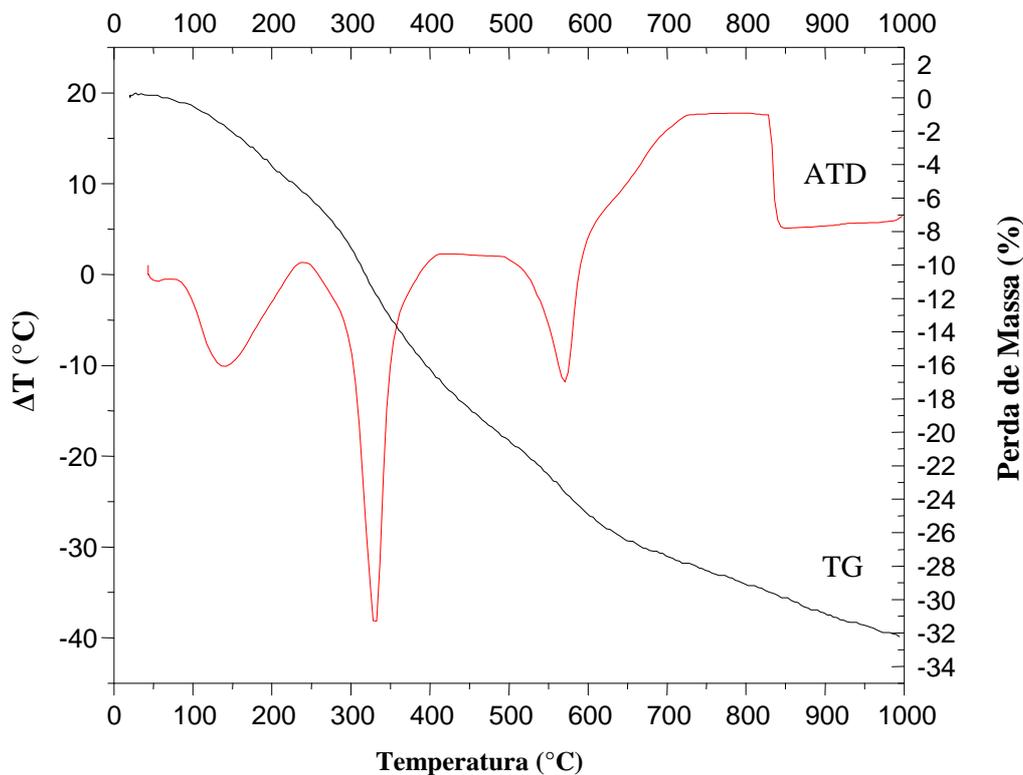


Figura 6.8 - Análise térmica diferencial do lodo de ETA

Analisando as curvas da Figura 6.8 verifica-se para a ATD que o resíduo do lodo ETA apresenta pico endotérmico a 110 °C correspondente a presença de água livre ou adsorvida; pico endotérmico a 330 °C relacionado à decomposição do hidróxido de magnésio; banda exotérmica entre 330 °C e 530 °C correspondente a matéria orgânica; pico endotérmico a 550 °C associado à eliminação de hidroxila. Para curva de TG verifica-se uma perda total de massa de 32% correspondente a perda de água, matéria orgânica, hidróxido de cálcio e hidroxila.

As amostras CCA e cinza de lenha mostraram-se com elevada capacidade corrosiva e fundente no ensaio de perda ao fogo, por isso não foi realizada a análise térmica dessas amostras, a fim de preservar o equipamento (o equipamento utilizado não utiliza porta amostra descartáveis de cerâmica e sim fixo de metal).

### 6.3.3 – Análise por Difração de Raios X dos Materiais

Os resultados dos difratogramas de raios X para CCA, cinza de lenha, lodo de ETA, A1 e A2 são apresentados na Figuras 6.9.

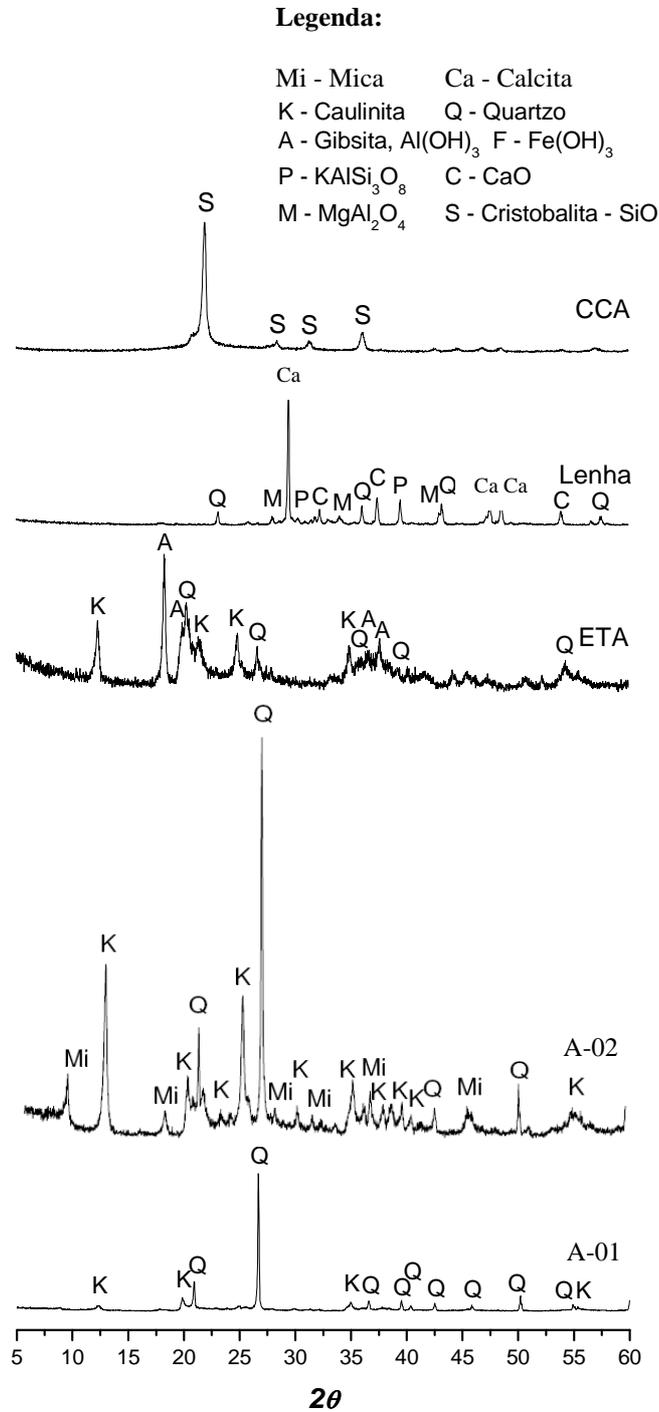


Figura 6.9 – Difração de raios X dos materiais

Analisando os resultados dos difratogramas de raios X na Figura 6.9, verifica-se a presença das seguintes fases mineralógicas; A1 é constituída de caulinita e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ); A2 é constituída de mica, caulinita e quartzo; o lodo da ETA é constituído de caulinita, quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e gibsita  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ; a cinza da lenha é constituída de quartzo, aluminato de magnésio ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), carbonato de cálcio ou calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ); a cinza de casca de arroz é constituída de cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ).

## **6.4 – ENSAIOS PRELIMINARES**

### **6.4.1 – Avaliação da Absorção e do Módulo de Ruptura à Flexão das Composições**

Os valores dos parâmetros absorção de água (AA) e do módulo de ruptura à flexão (MRF) dos corpos-de-prova preparados com as composições A (argila, lodo de ETA e CCA) e B (argila, cinza de lenha e CCA) e queimados nas temperaturas a 800 °C, 900 °C e 1000 °C, estão apresentados nas Tabelas 6.6 e 6.7, respectivamente.

Tabela 6.6 – Valores da absorção de água (AA), módulo de ruptura à flexão (MRF) e retração de queima (RQ) das composições A

Formulações		Temperatura de 800 °C			Temperatura de 900 °C			Temperatura de 1000 °C		
		AA (%)	MRF (MPa)	RQ (cm)	AA (%)	MRF (MPa)	RQ (cm)	AA (%)	MRF (MPa)	RQ (cm)
Replicata 1	1	15,95	3,71	- 0,41	17,07	6,49	- 0,17	16,07	12,83	1,08
	2	-	-	- 0,07	39,89	0,69	0,61	38,15	1,03	2,41
	3	-	-	- 0,10	34,83	0,91	- 0,54	34,25	1,16	- 0,27
	4	-	-	- 0,05	27,69	2,17	0,40	27,29	3,12	1,36
	5	-	-	- 0,04	23,29	2,18	- 0,50	23,46	2,76	- 0,23
	6	37,71	0,43	- 0,34	37,74	0,53	- 0,41	37,66	0,69	0,04
	7	29,87	0,99	- 0,30	29,80	1,11	- 0,31	29,61	1,50	0,22
	8	23,74	2,52	- 0,20	23,01	3,19	- 0,09	22,44	4,20	0,67
	9	34,93	0,62	- 0,11	35,43	0,79	- 0,02	34,46	1,11	0,91
	10	-	-	- 0,07	30,66	1,10	- 0,49	31,08	1,06	- 0,27
Replicata 2	1	16,82	4,34	- 0,05	17,31	6,66	0,65	16,25	9,06	1,08
	2	38,61	0,41	0,38	42,10	0,58	0,82	38,69	0,98	2,5
	3	35,63	0,79	- 0,60	33,01	1,06	- 0,69	32,34	1,19	- 0,32
	4	27,80	1,69	- 0,07	27,29	2,26	0,46	27,67	3,31	1,68
	5	24,88	1,49	- 0,54	23,23	2,08	- 0,49	23,12	2,63	- 0,08
	6	39,09	0,43	- 0,42	36,94	0,53	- 0,32	36,52	0,74	- 0,02
	7	30,43	0,99	- 0,39	28,59	1,36	- 0,31	28,61	1,66	0,25
	8	22,95	2,07	- 0,30	22,56	2,81	- 0,14	22,24	3,64	0,58
	9	36,69	0,52	- 0,26	34,87	0,75	- 0,09	34,45	0,97	0,80
	10	32,92	0,83	- 0,66	30,38	1,01	- 0,60	30,03	1,27	- 0,12
Replicata 3	1	17,56	3,77	- 0,14	18,18	6,57	0,03	17,19	9,02	1,14
	2	40,26	0,51	0,26	39,61	0,50	0,65	37,14	0,93	2,31
	3	38,96	0,49	- 0,50	35,39	0,51	- 0,47	33,75	0,88	- 0,06
	4	30,30	1,42	0,15	30,01	1,22	1,08	27,72	2,75	1,93
	5	24,91	1,70	- 0,58	23,80	1,55	- 0,60	23,00	2,48	- 0,22
	6	38,55	0,40	- 0,31	37,46	0,36	- 0,19	35,94	0,72	0,52
	7	30,32	1,05	- 0,25	29,87	1,00	- 0,20	28,12	1,84	0,68
	8	24,42	2,58	- 0,14	23,10	2,57	- 0,07	21,97	4,78	0,98
	9	35,00	0,69	0,03	34,40	0,73	0,26	32,44	1,31	1,47
	10	33,72	0,63	- 0,48	32,27	0,65	- 0,38	31,02	1,09	0,12

Tabela 6.7 – Valores da absorção de água (AA), módulo de ruptura à flexão (MRF) e retração de queima (RQ) das composições B

Formulações		Temperatura de 800°C			Temperatura de 900°C			Temperatura de 1000°C		
		AA (%)	MRF (MPa)	RQ (cm)	AA (%)	MRF (MPa)	RQ (cm)	AA (%)	MRF (MPa)	RQ (cm)
Replicata 1	1	19,78	4,82	- 0,10	18,97	6,07	0,13	17,42	9,24	1,25
	2	32,23	7,17	- 1,26	34,05	6,55	- 1,10	34,06	3,01	- 2,18
	3	36,71	0,72	- 0,59	36,08	0,92	- 0,61	35,86	1,11	- 0,31
	4	25,16	10,82	- 0,08	21,09	9,05	0,77	18,54	7,41	1,08
	5	25,17	1,84	- 0,51	24,79	2,37	- 0,48	24,53	2,97	- 0,09
	6	39,73	2,33	- 0,72	38,23	1,79	0,07	37,60	1,94	0,17
	7	28,36	4,21	- 0,40	27,31	3,82	0,13	26,32	3,65	0,43
	8	20,37	5,50	- 0,30	21,95	5,42	0,11	18,23	7,04	1,10
	9	27,34	7,05	- 0,46	27,33	5,85	- 0,03	25,51	5,02	- 0,25
	10	31,78	2,05	- 0,60	31,96	1,94	- 0,26	30,86	2,17	0,02
Replicata 2	1	16,94	3,76	- 0,08	16,49	6,11	0,09	16,49	9,85	1,22
	2	-	-	-	-	-	-	37,92	2,12	-
	3	39,52	0,57	- 0,49	38,21	0,67	- 0,49	35,43	0,91	0,05
	4	23,65	11,54	- 0,29	22,01	9,38	0,43	19,45	6,09	0,35
	5	25,65	1,70	- 0,42	24,90	2,19	- 0,46	23,67	3,12	0,26
	6	41,42	3,28	- 1,55	37,57	2,28	0,15	32,55	1,96	0,21
	7	29,62	6,01	- 0,39	26,87	4,23	0,20	25,81	4,14	0,52
	8	22,16	5,01	- 0,30	19,86	5,47	0,12	19,74	6,69	1,36
	9	33,84	5,35	- 1,60	32,61	3,40	0,30	28,38	2,04	- 0,15
	10	34,99	1,45	- 0,44	32,77	1,57	- 0,22	30,50	1,82	0,45
Replicata 3	1	18,00	4,37	- 0,10	17,88	4,20	- 0,10	16,41	11,31	1,17
	2	-	-	-	34,12	6,00	-	33,84	3,16	- 1,24
	3	38,77	0,51	- 0,52	34,56	0,52	- 0,50	32,53	1,05	0,01
	4	23,39	8,75	- 0,29	20,27	8,92	0,51	18,38	4,05	0,62
	5	25,01	1,59	- 0,51	23,56	1,58	- 0,61	22,84	2,94	- 0,11
	6	44,38	1,69	- 1,81	35,42	1,19	0,27	35,58	1,25	0,10
	7	30,20	4,93	- 0,46	26,60	2,36	0,11	24,53	2,83	0,35
	8	22,15	4,69	- 0,27	19,87	4,50	0,07	17,73	6,93	1,05
	9	33,14	7,45	- 1,06	26,75	4,04	0,22	26,05	3,24	- 0,32
	10	34,70	1,35	- 0,45	31,66	1,11	- 0,20	29,46	1,91	0,36

#### 6.4.2 – Valores Estatísticos Relevantes

Neste trabalho utilizou-se o planejamento experimental através do delineamento de misturas.

Os resultados obtidos para a absorção de água (AA), módulo de ruptura (MRF) e retração de queima (RQ) apresentados nas Tabelas 6.6 e 6.7, foram discutidos mediante utilização da técnica de análise do delineamento de misturas e análise de superfície de respostas.

A partir dos resultados obtidos em replicatas foi possível gerar equações de regressão de acordo com vários modelos, correlacionando as proporções dos constituintes nas composições com os parâmetros analisados, escolhendo-se as equações que apresentaram significância estatística ao nível de 95% de confiança.

Os modelos que apresentaram os melhores resultados foram todos quadráticos (equação B apresentada no item 4.2.2.3). Nas Tabelas 6.8 e 6.9 estão apresentados os valores encontrados para as composições A e B.

Tabela 6.8 – Estatísticas relevantes da análise de variância das variáveis de absorção de água (AA), módulo de ruptura (MRF) e retração de queima (RQ) para a composição A

Propriedade	Temperatura	Modelo	Teste F	Valor p <sup>a</sup>	R <sup>2</sup>
AA	800 °C	Quadrático	3,7387	0,028856	0,987412
AA	900 °C	Quadrático	8,0742	0,000684	0,988242
AA	1000 °C	Quadrático	8,1465	0,000649	0,991646
MRF	800 °C	Quadrático	16,8137	0,000014	0,980282
MRF	900 °C	Quadrático	61,11084	0,000000	0,980449
MRF	1000 °C	Quadrático	26,35724	0,000000	0,951222
RQ	800 °C	Linear	12,1211	0,0002	0,473092
RQ	900 °C	Quadrático	10,2797	0,0005	0,711223
RQ	1000 °C	Quadrático	31,1801	< 0,0001	0,946229

<sup>a</sup> Nível de significância da análise de 5%

Tabela 6.9 – Estatísticas relevantes da análise de variância das variáveis de absorção de água (AA), módulo de ruptura (MRF) e retração de queima (RQ) para a composição B

Propriedade	Temperatura	Modelo	Teste F	Valor p <sup>a</sup>	R <sup>2</sup>
AA	800 °C	Quadrático	12,68362	0,000050	0,956290
AA	900 °C	Quadrático	13,9311	0,000022	0,964909
AA	1000 °C	Quadrático	20,80914	0,000001	0,961321
MRF	800 °C	Quadrático	31,83744	0,000000	0,950632
MRF	900 °C	Quadrático	18,74107	0,000002	0,924562
MRF	1000 °C	Quadrático	9,23951	0,000990	0,926422
RQ	800 °C	Quadrático	10,5358	0,0034	0,674593
RQ	900 °C	Quadrático	70,1897	< 0,0001	0,931295
RQ	1000 °C	Quadrático	25,5661	< 0,0001	0,909348

<sup>a</sup> Nível de significância da análise de 5%

Os modelos matemáticos correlacionando os valores da absorção de água, o módulo de ruptura a flexão e a retração de queima (nas temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C) com as proporções dos constituintes são apresentados nas Tabelas 6.10, 6.11 e 6.12, respectivamente, para a composição A.

Tabela 6.10 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura à flexão (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura de 800 °C

ABS 800	Coeff.	MR 800	Coeff.	RQ 800	Coeff.
(A) Argila	16,8695	(A) Argila	3,9784	(A) Argila	-0,214156
(B) ETA	55,1914	(B) ETA	-	(B) ETA	0,393812
(C) CCA	75,6546	(C) CCA	2,5166	(C) CCA	-0,849778
AB	-	AB	-9,8044	AB	*
AC	-35,8730	AC	-10,4735	AC	*
BC	-	BC	-	BC	*

\* A Regressão após queima a 800 °C apresentou coeficiente de correlação muito baixo, e com isso não foi feita a superfície de resposta, já que não teria sentido estatisticamente

Tabela 6.11 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura à flexão (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura de 900 °C

ABS 900	Coeff.	MRF 900	Coeff.	RQ 900	Coeff.
(A) Argila	17,5759	(A) Argila	6,4902	(A)Argila	0,21653
(B) ETA	68,8819	(B) ETA	8,0093	(B)ETA	1,20658
(C) CCA	71,3665	(C) CCA	9,0048	(C)CCA	1,89448
AB	-	AB	-26,5579	AB	-
AC	-40,4826	AC	-27,5222	AC	-6,32680
BC	-	BC	-	BC	-7,10355

Tabela 6.12 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura à flexão (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura de 1000 °C

ABS 1000	Coeff.	MRF 1000	Coeff.	RQ 1000	Coeff.
(A) Argila	16,5448	(A) Argila	10,1588	(A) Argila	1,0714
(B) ETA	58,1734	(B) ETA	12,4052	(B) ETA	3,5541
(C) CCA	65,8946	(C) CCA	16,4194	(C) CCA	3,2456
AB	-	AB	-41,0737	AB	-
AC	-31,1463	AC	-48,5754	AC	-9,3249
BC	-7	BC	-	BC	-14,6172

Os modelos matemáticos correlacionando os valores da absorção de água, o módulo de ruptura a flexão e a retração de queima (nas temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C) com as proporções dos constituintes são apresentados nas Tabelas 6.13, 6.14 e 6.15, respectivamente, para a composição B.

Tabela 6.13 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura à flexão (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura na temperatura de 800 °C

ABS 800	Coeff.	MRF 800	Coeff.	RQ 800	Coeff.
(A) Argila	18,3255	(A) Argila	4,2255	(A) Argila	-0,15444
(B) ETA	61,7725	(B) ETA	-25,3863	(B) ETA	-8,36164
(C) CCA	88,7297	(C) CCA	-	(C) CCA	-1,06208
AB	-	AB	71,0914	AB	10,42861
AC	-60,8255	AC	-	AC	*
BC	91,6620	BC	-25,1537	BC	*

\* A Regressão após queima a 800 °C apresentou coeficiente de correlação muito baixo, e com isso não foi feita a superfície de resposta, já que não teria sentido estatisticamente

Tabela 6.14 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura à flexão (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura na temperatura de 900 °C

ABS 900	Coeff.	MRF 900	Coeff.	RQ 900	Coeff.
(A) Argila	17,8681	(A) Argila	5,5348	(A) Argila	0,0280
(B) ETA	88,9372	(B) ETA	-15,7342	(B) ETA	-10,1761
(C) CCA	75,8109	(C) CCA	-	(C) CCA	1,5872
AB	-78,8183	AB	44,5640	AB	16,3762
AC	-41,7756	AC	-21,8106	AC	-5,4155
BC	-	BC	-34,2210	BC	14,4131

Tabela 6.15 – Valores de absorção de água (AA), módulo de ruptura à flexão (MRF) e retração de queima (RQ) na temperatura na temperatura de 1000 °C

ABS 1000	Coeff.	MRF 1000	Coeff.	RQ 1000	Coeff.
(A) Argila	16,830	(A) Argila	10,1137	(A) Argila	1,2902
(B) ETA	112,275	(B) ETA	-4,9334	(B) ETA	-12,7043
(C) CCA	67,902	(C) CCA	9,8737	(C) CCA	2,3866
AB	-118,999	AB	-35,9945	AB	15,6816
AC	-	AC	-	AC	-7,7000
BC	-	BC	-	BC	17,0960

### 6.4.3 – Absorção de Água

Verifica-se nas Figuras 6.10 a 6.25 que a influência da combinação das matérias-primas sobre a absorção de água, módulo de ruptura e retração de queima se altera conforme a temperatura de queima.

As Figuras 6.10 a 6.15 apresentam as superfícies de resposta e suas projeções dentro do triângulo das composições para a absorção de água nas temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C. A superfície de resposta em 3-D é a representação gráfica das equações presentes nas Tabelas 6.10 a 6.15 e permite uma estimativa fácil e rápida das composições em estudo.

A temperatura de 800 °C para a composição B mostrou que o incremento na quantidade de cinza de lenha pode reduzir a absorção. Na temperatura de 900 °C para a composição A, percebeu-se uma discreta diminuição da absorção com a adição de CCA, e um aumento da mesma com a adição de resíduo de ETA. No entanto, quando se realiza a

queima a 1000 °C, observa-se que a adição dos resíduos, analisando em teores fixos de argila, aumenta a absorção de água.

#### **6.4.4 – Módulo de Ruptura à Flexão**

As Figuras 6.16 a 6.21 apresentam a superfície de resposta para o módulo de ruptura a flexão. Como indica a Figura 6.16, 6.18 e 6.20, os valores mais elevados do módulo de ruptura correspondem às composições com altas quantidades de argila (>90%) para as temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C na composição A. Já para a composição B nas temperaturas de 800 °C e 900 °C apresentadas nas Figuras 6.17 e 6.19, observou-se que os valores elevados do módulo de ruptura estão associados ao incremento das quantidades de argila e cinza de lenha. Uma nítida redução no módulo de ruptura pode ser observada quando a quantidade de CCA aumenta. O aumento da quantidade de resíduo de CCA diminui o módulo de ruptura em todas as temperaturas.

Pode-se observar que após queima a 1000 °C a composição B com elevados teores de resíduo estão entre as que apresentam os menores módulos de ruptura. O que está provavelmente associado às características física-mineralógicas do resíduo, e também ao fato da argila nessa temperatura de queima ter desenvolvido elevada quantidade da fase vítrea e ligação cerâmica entre seus constituintes aumentando sua resistência (o que minimiza o efeito benéfico e sinérgico do resíduo da lenha observado quando das queimas a 800 °C e 900 °C). Verifica-se que os corpos-de-prova com os maiores módulos após queima a 1000 °C são os que apresentam elevados teores de material plástico (argila).

A cinza de lenha melhora o desempenho dos corpos de prova quando da queima a 800 °C e 900 °C, visto que apresenta na sua composição CaO (óxido de cálcio) como principal constituinte mineral, além de apresentar elevadas quantidades de fundentes tais como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O e CaO, o que pode favorecer o desenvolvimento de fases líquidas em baixas temperaturas (através de formação de eutéticos), sendo muito bom para as indústrias de cerâmica vermelha, pois estas queimam a baixas temperaturas. E também evidencia, que nesse caso, os maiores módulos não estão relacionados com as menores absorções, possivelmente devido a características microestruturais do sistema (como novas fases cristalinas, por exemplo).

#### **6.4.5 – Retração de Queima**

As Figuras 6.22 a 6.25 apresentam a superfície de resposta para retração de queima. Observa-se que para a temperatura de 900 °C as composições A e B se comportaram de formas diferentes. Enquanto na composição A o aumento de CCA diminuiu a retração e a adição de ETA pode causar elevada retração, na composição B quanto maior o incremento dos resíduos de CCA e lenha menor foi a retração de queima. Na temperatura de 1000 °C para a composição A, a CCA se comporta de forma semelhante que na temperatura de 900 °C, ou seja, sua adição é benéfica para a retração e o resíduo de ETA pode aumentar a retração. Já na composição B para 1000 °C, o incremento de CCA pode não reduzir tanto a retração quanto na temperatura de 900 °C, e o incremento do resíduo de ETA diminui a retração de queima.

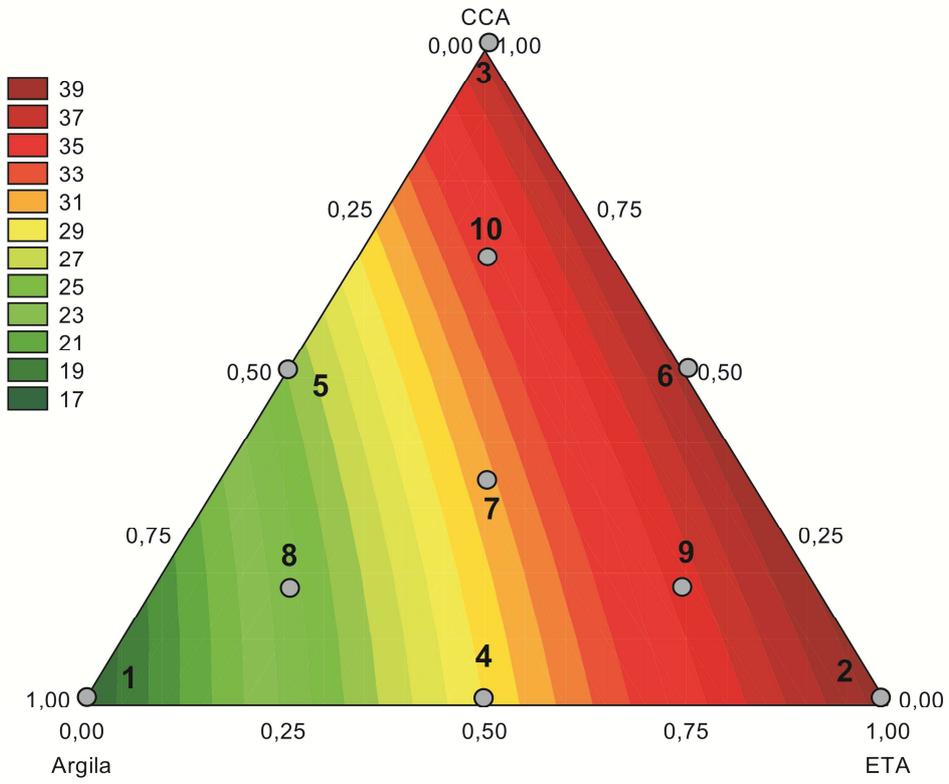
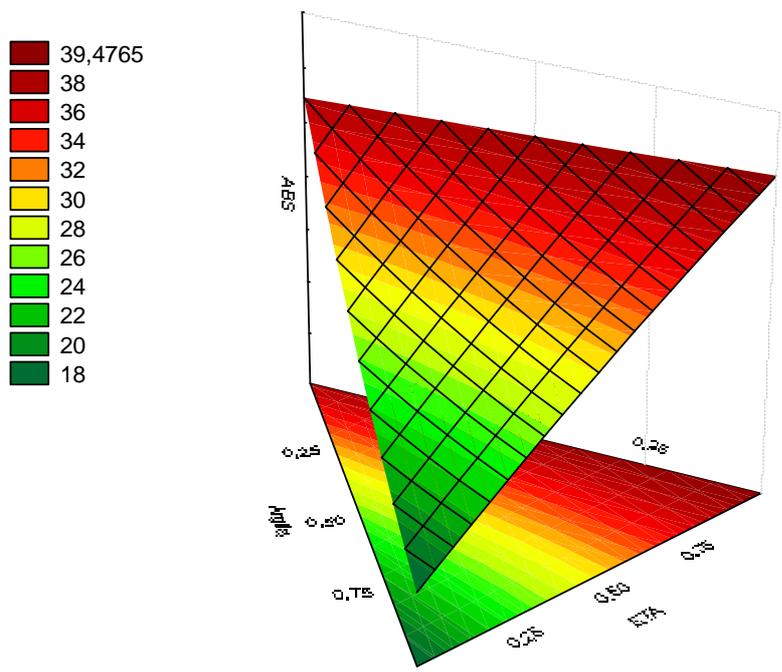


Figura 6.10 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 800 °C para a composição A

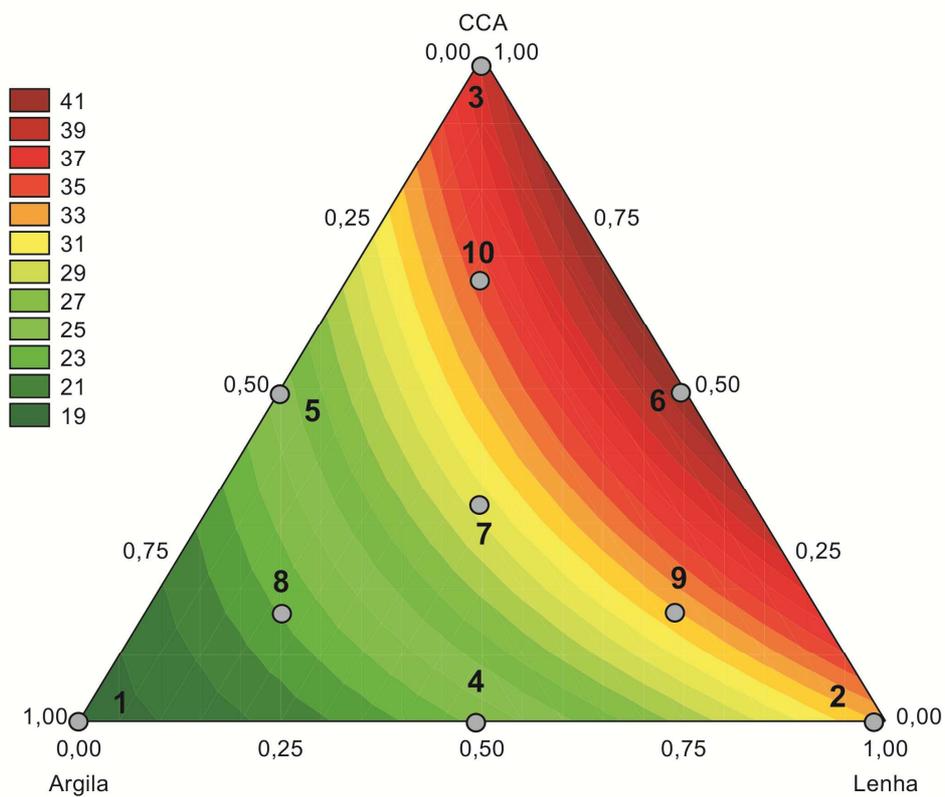
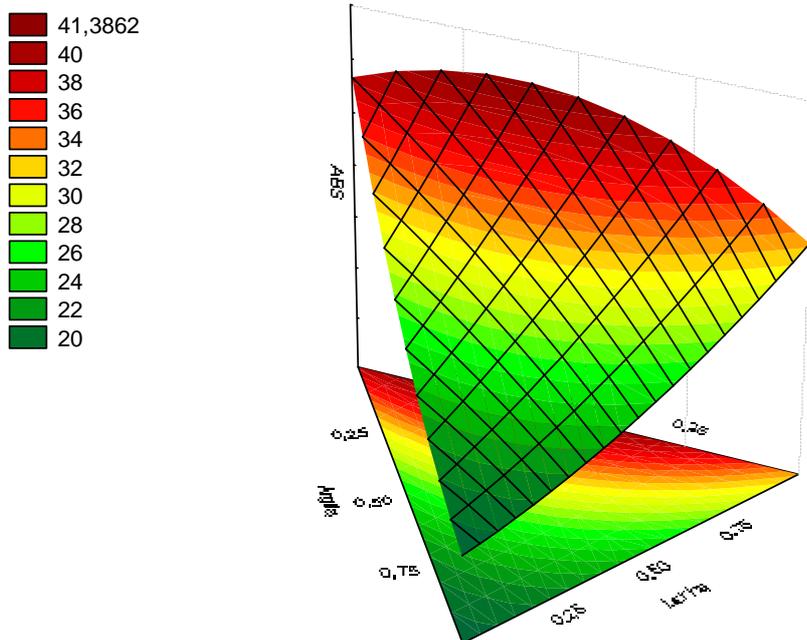


Figura 6.11 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 800 °C para a composição B

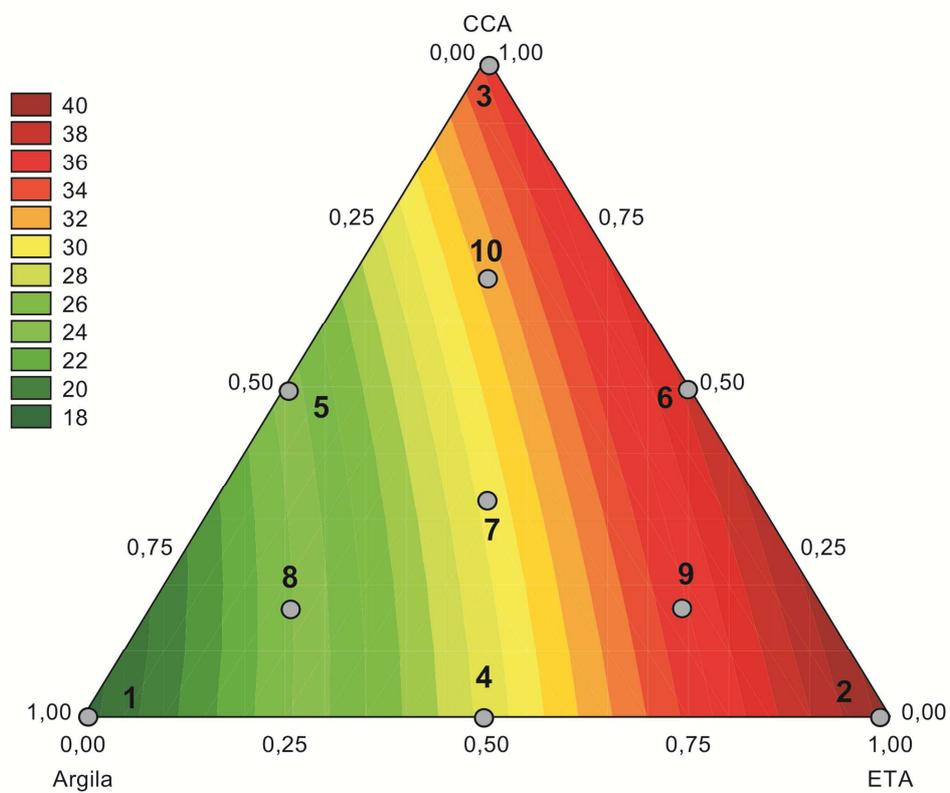
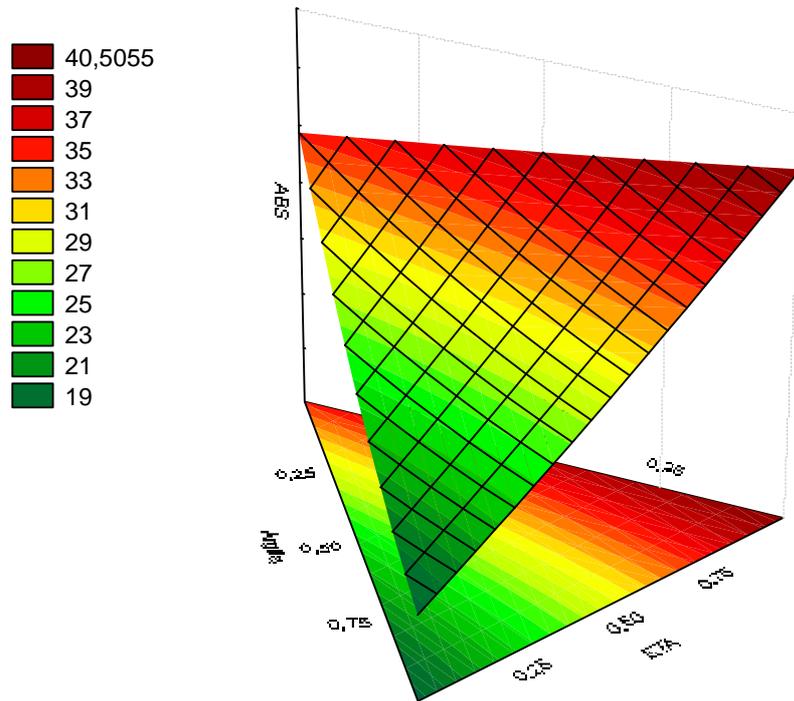


Figura 6.12 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 900 °C para a composição A

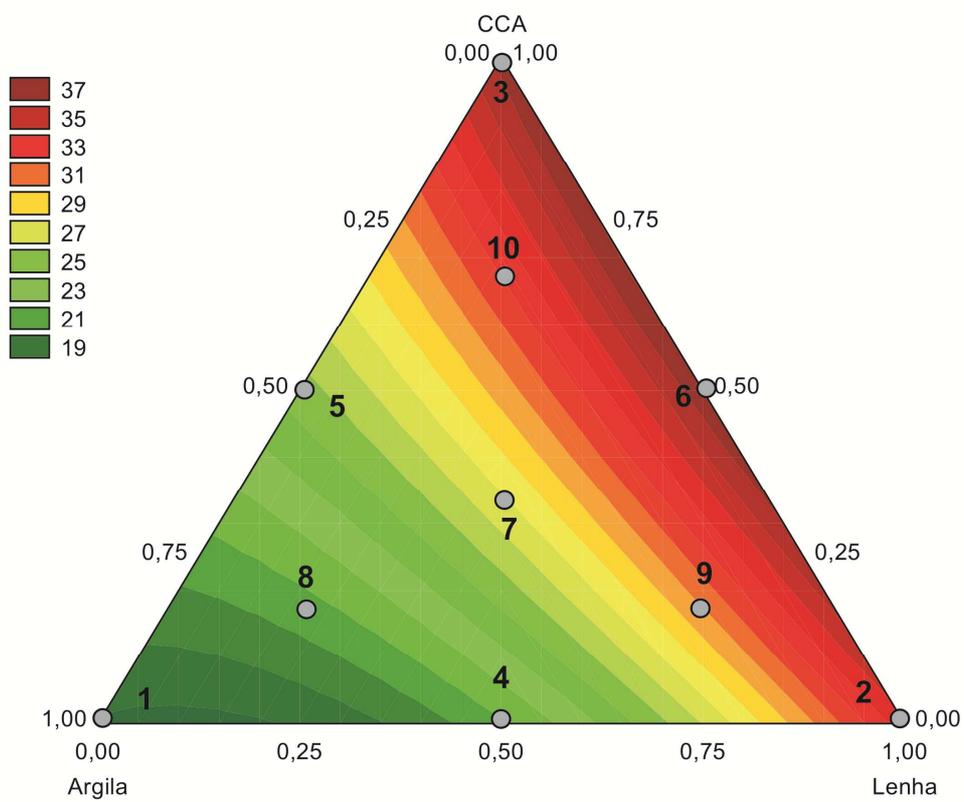
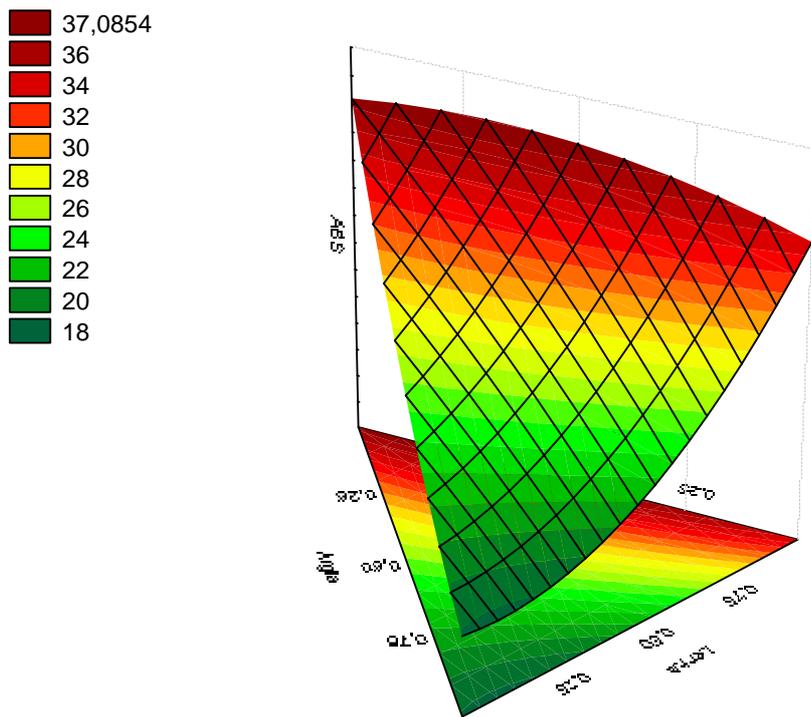


Figura 6.13 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 900 °C para a composição B

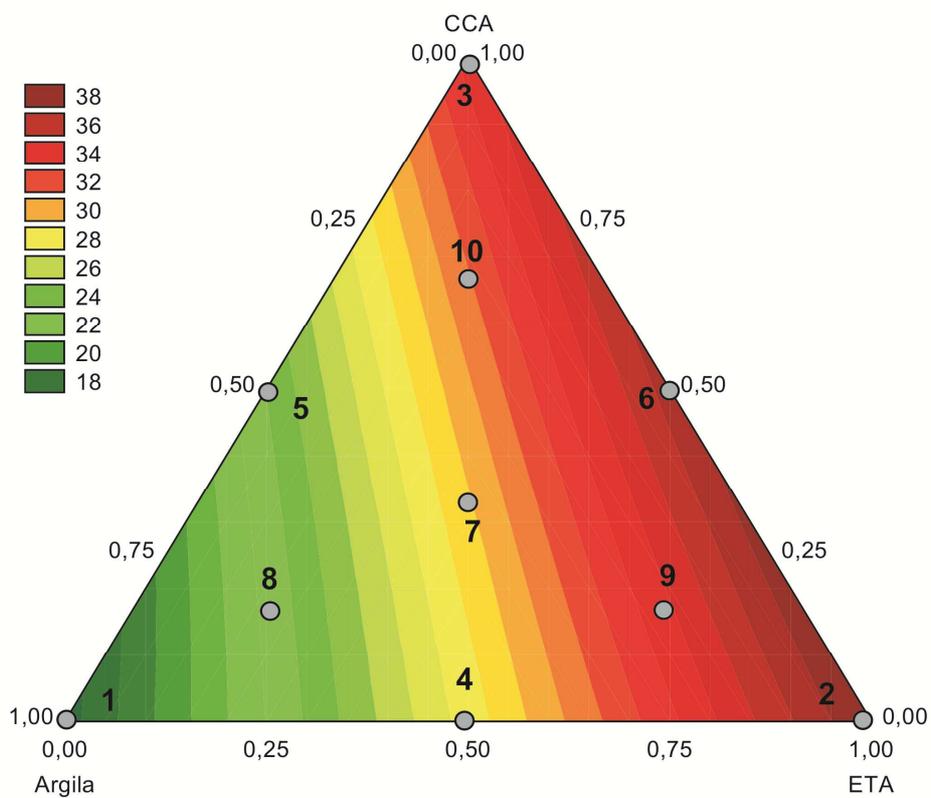
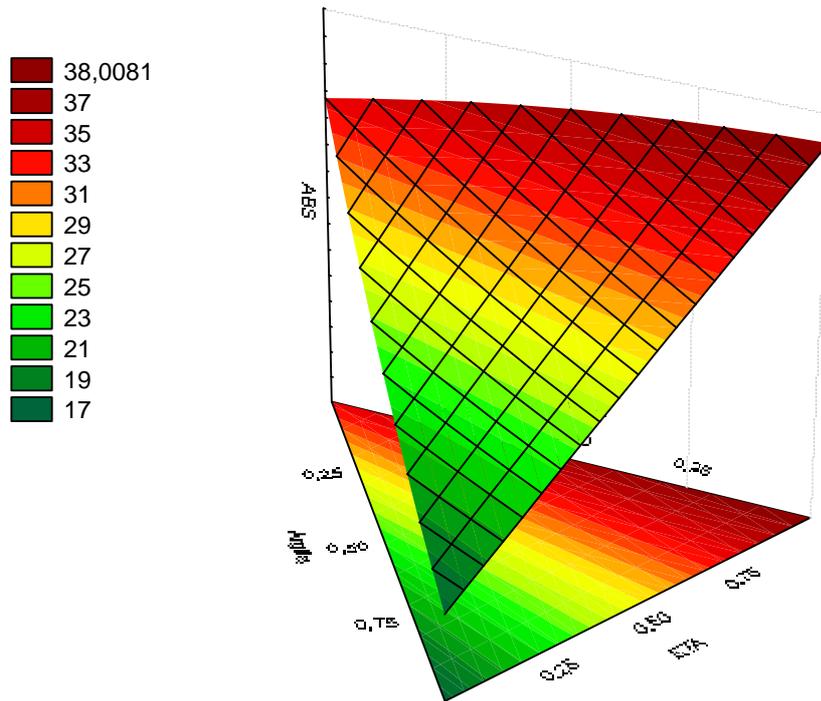


Figura 6.14 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 1000 °C para a composição A

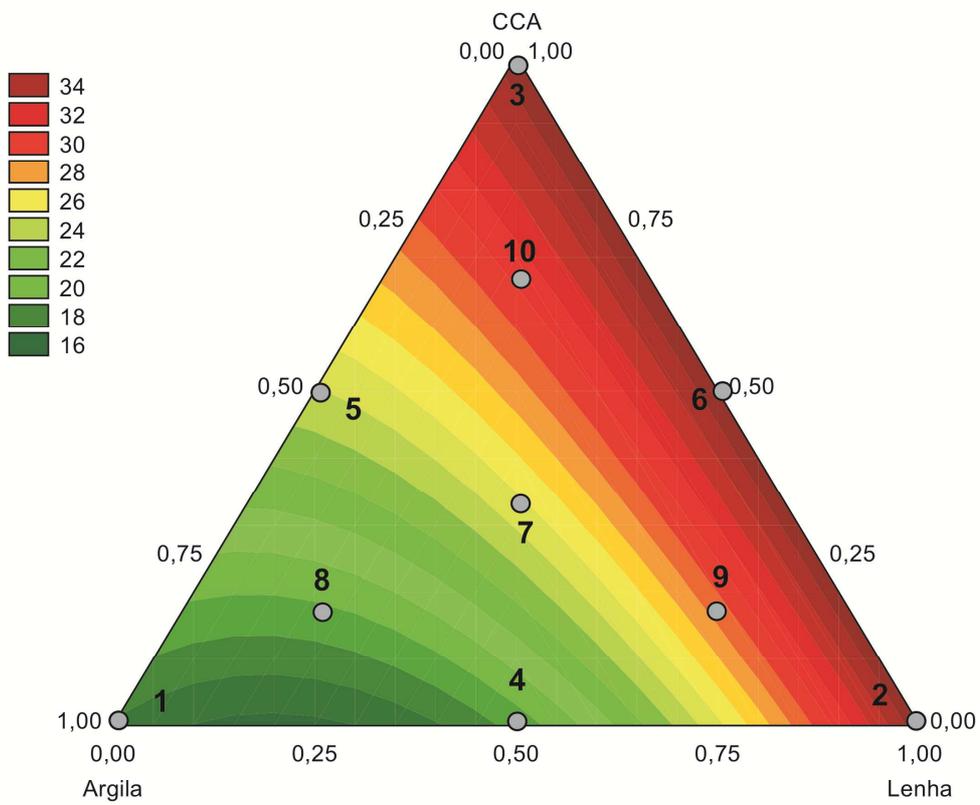
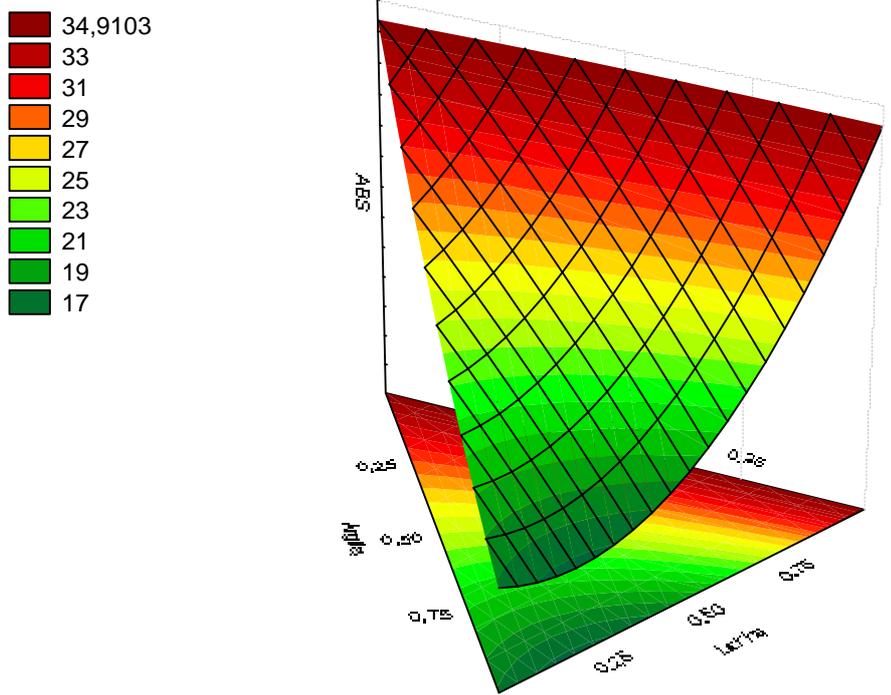


Figura 6.15 – Superfície de resposta para a absorção de água após queima a 1000 °C para a composição B

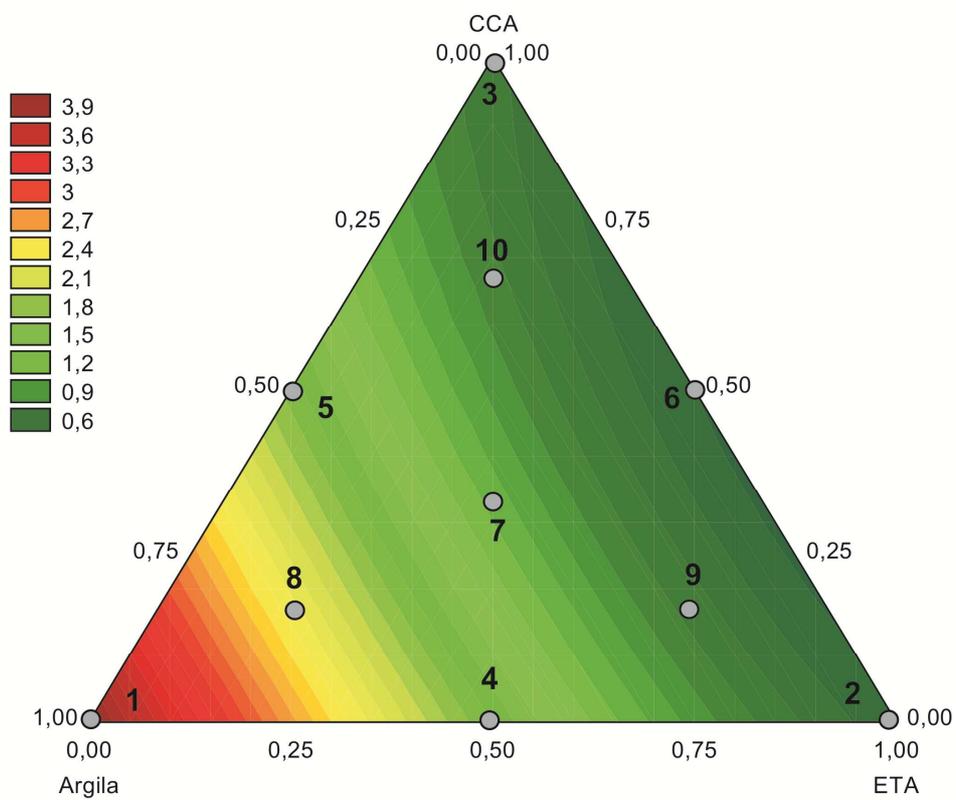
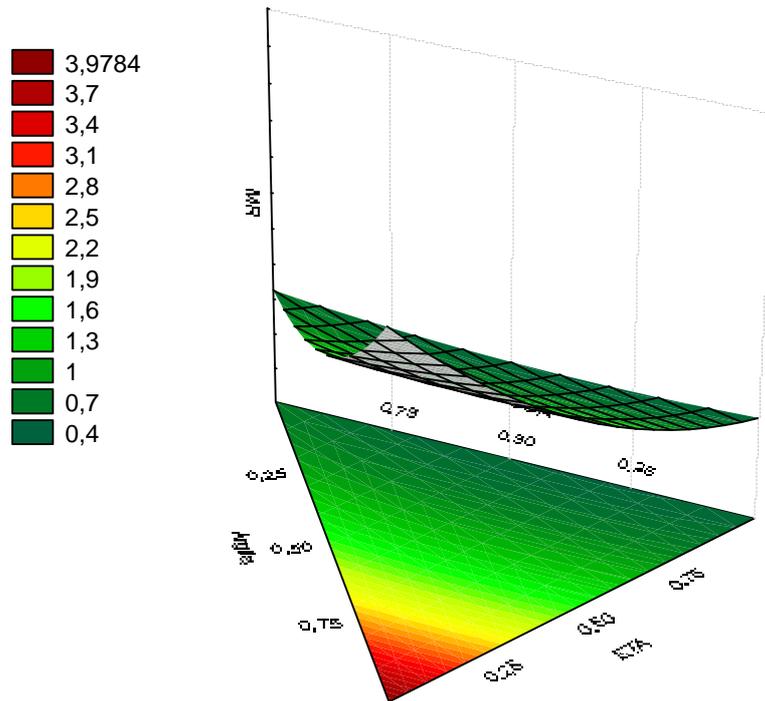


Figura 6.16 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 800 °C para a composição A

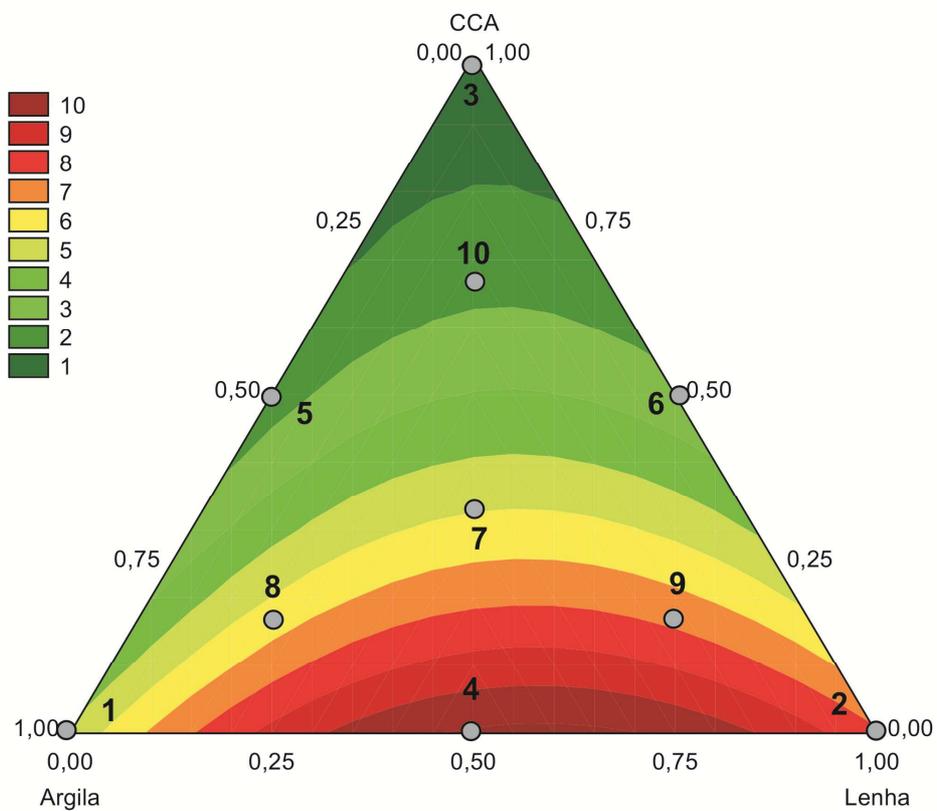
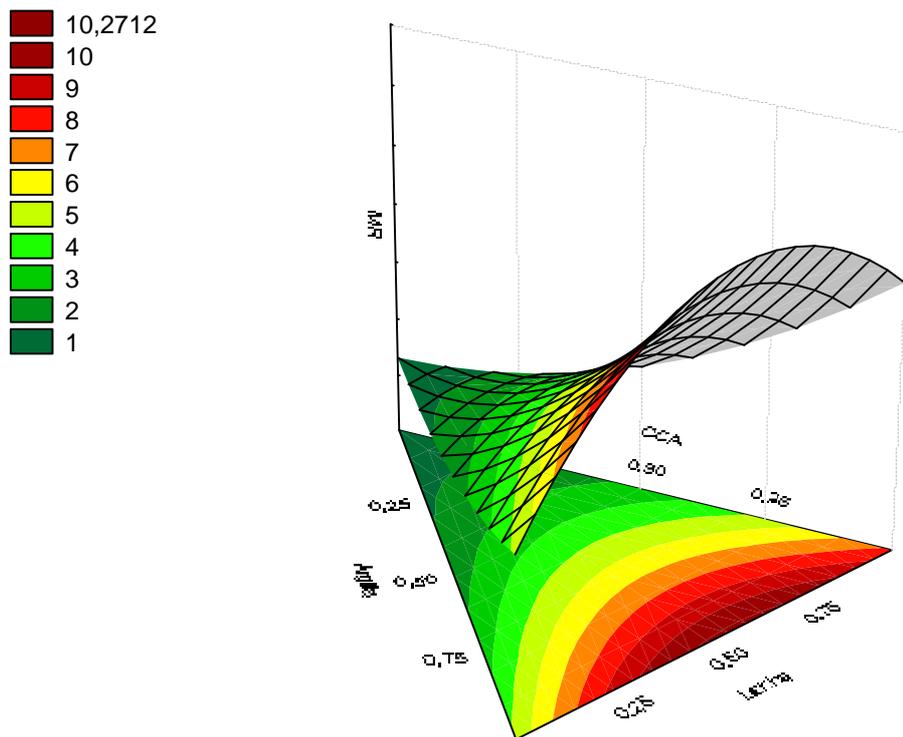


Figura 6.17 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 800 °C para a composição B

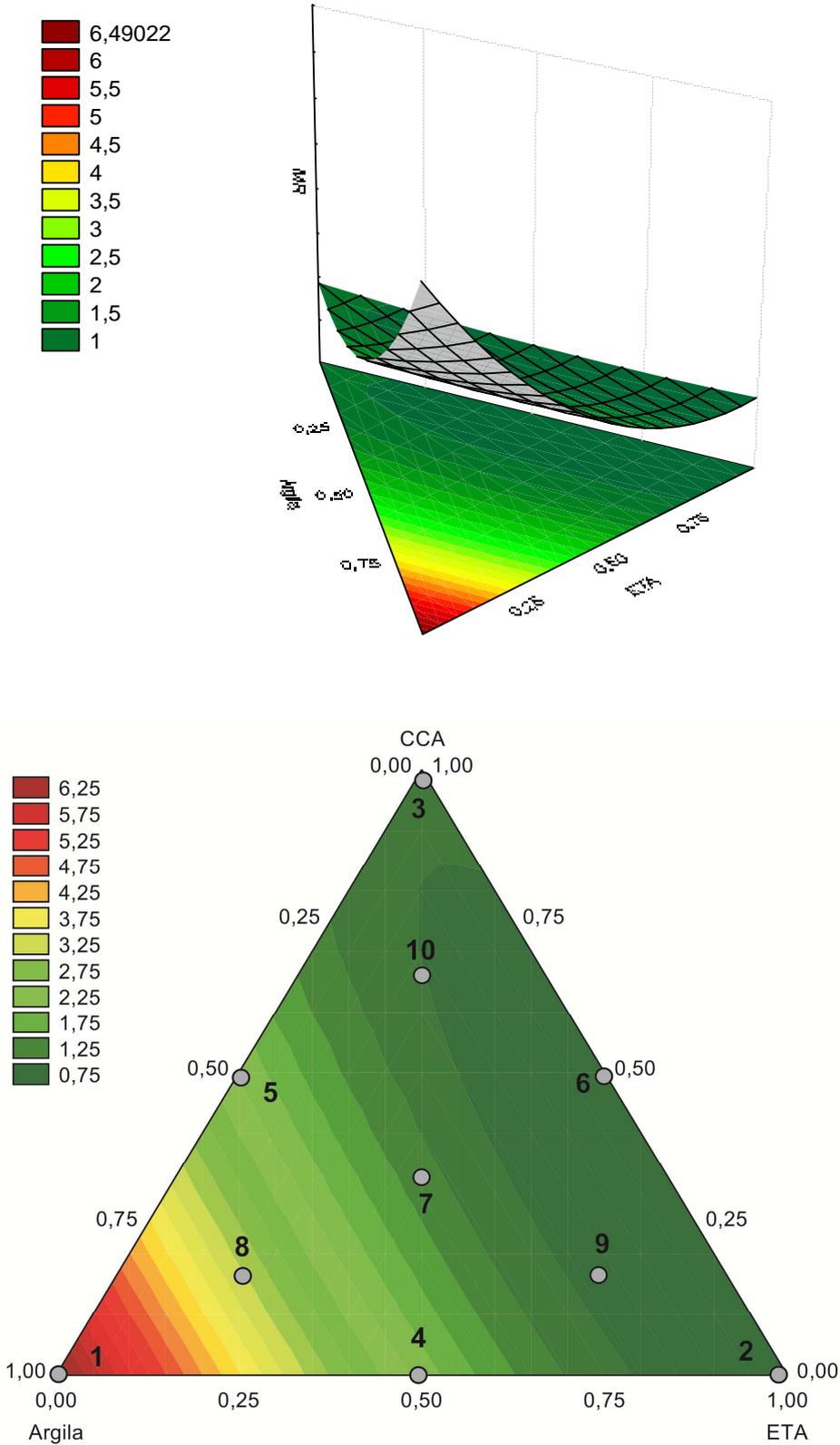


Figura 6.18 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 900 °C para a composição A

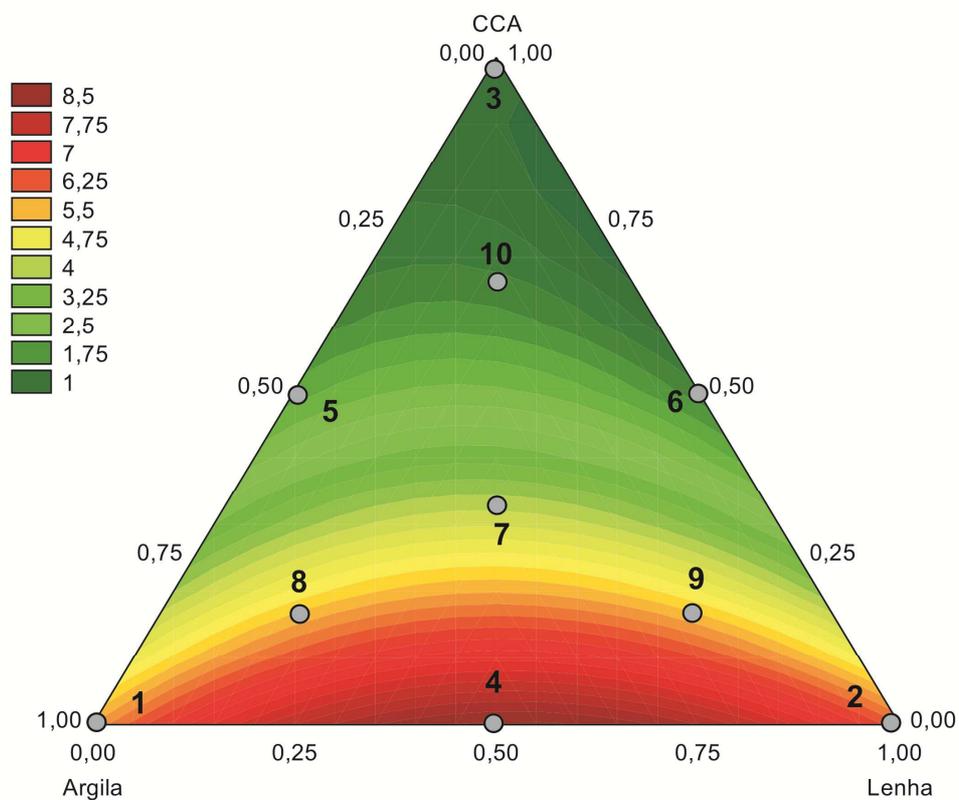
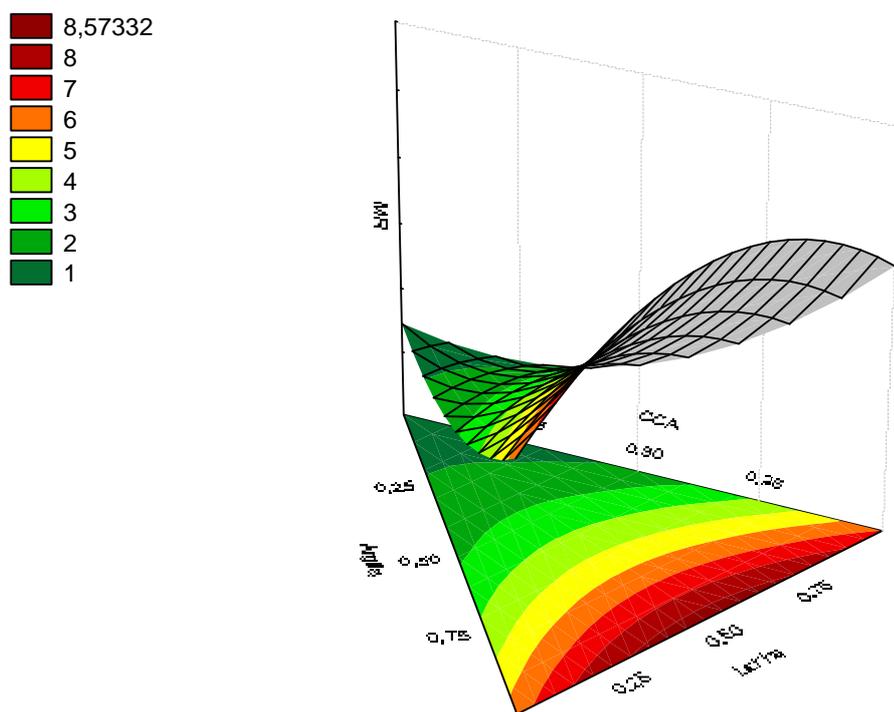


Figura 6.19 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 900 °C para a composição B

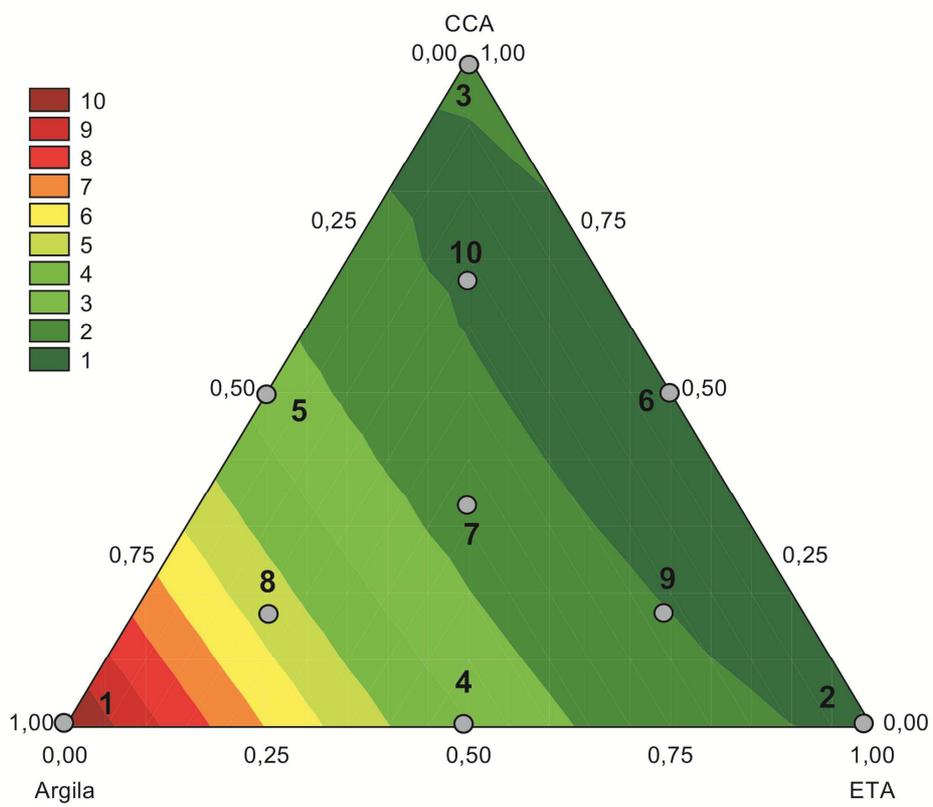
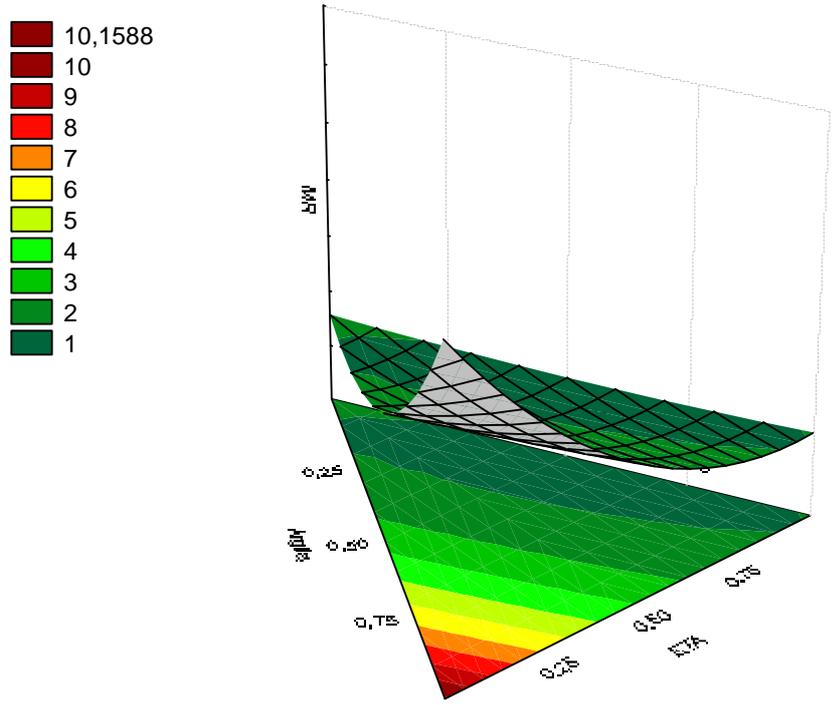


Figura 6.20 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 1000 °C para a composição A

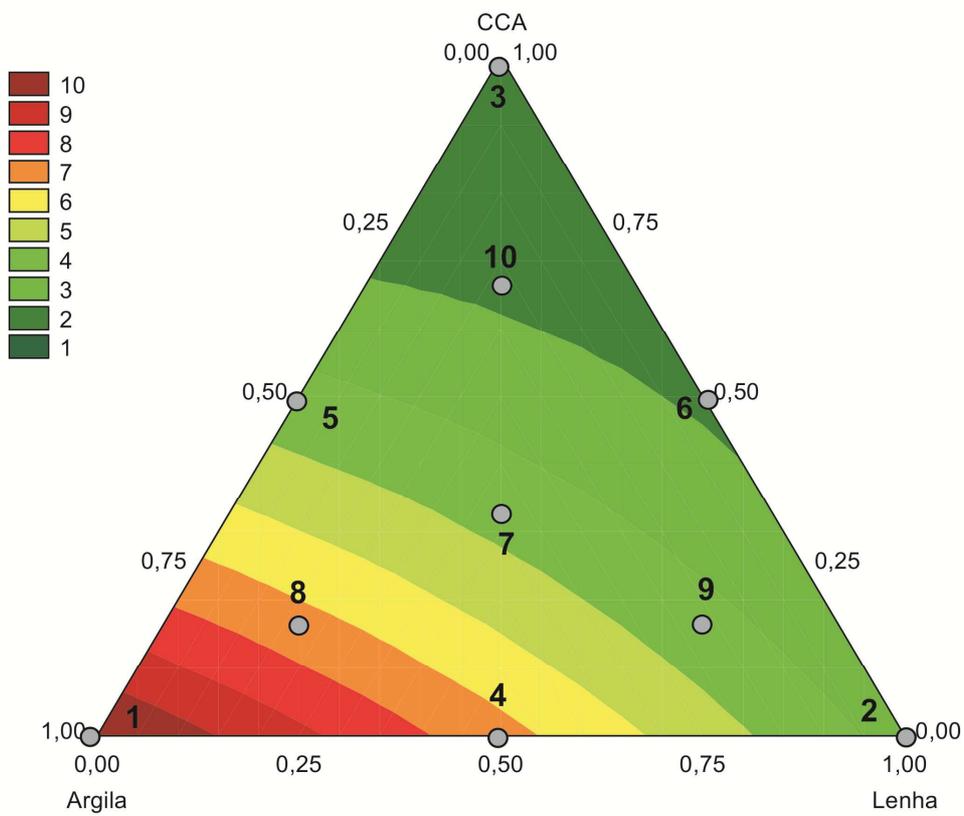
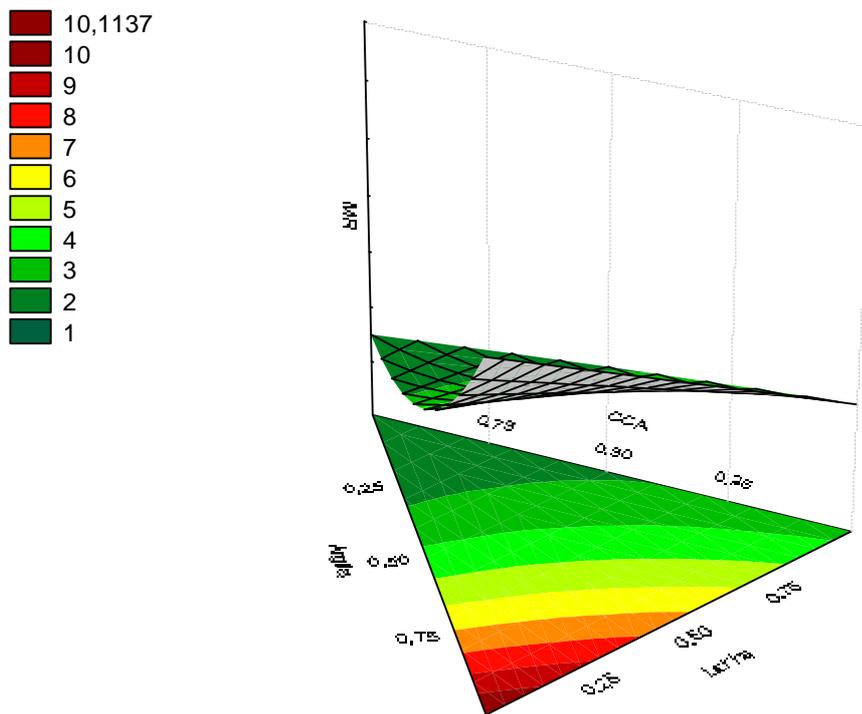


Figura 6.21 – Superfícies de resposta para o módulo de ruptura após queima a 1000 °C para a composição B

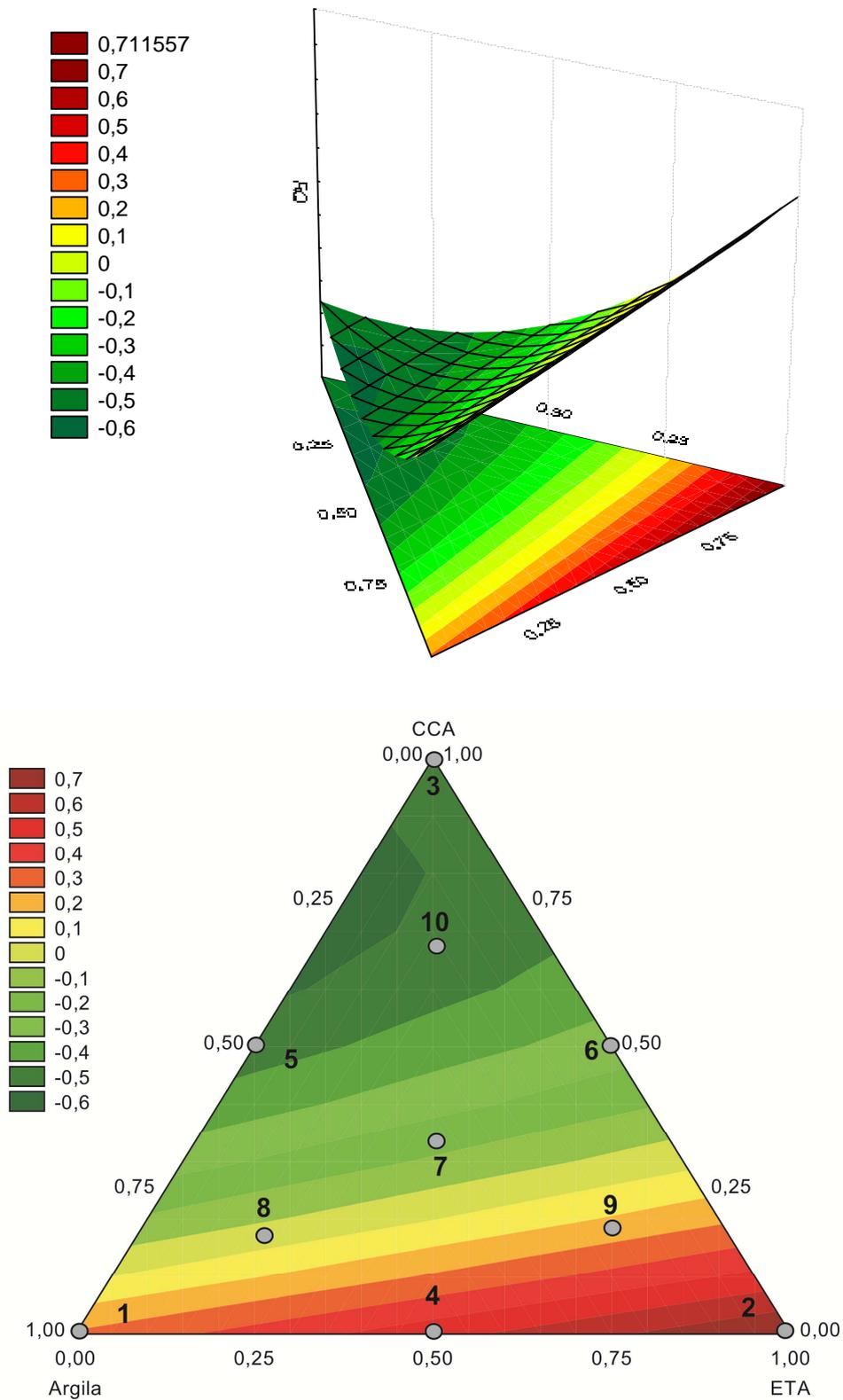


Figura 6.22 – Superfícies de resposta para a retração após queima a 900 °C para a composição A

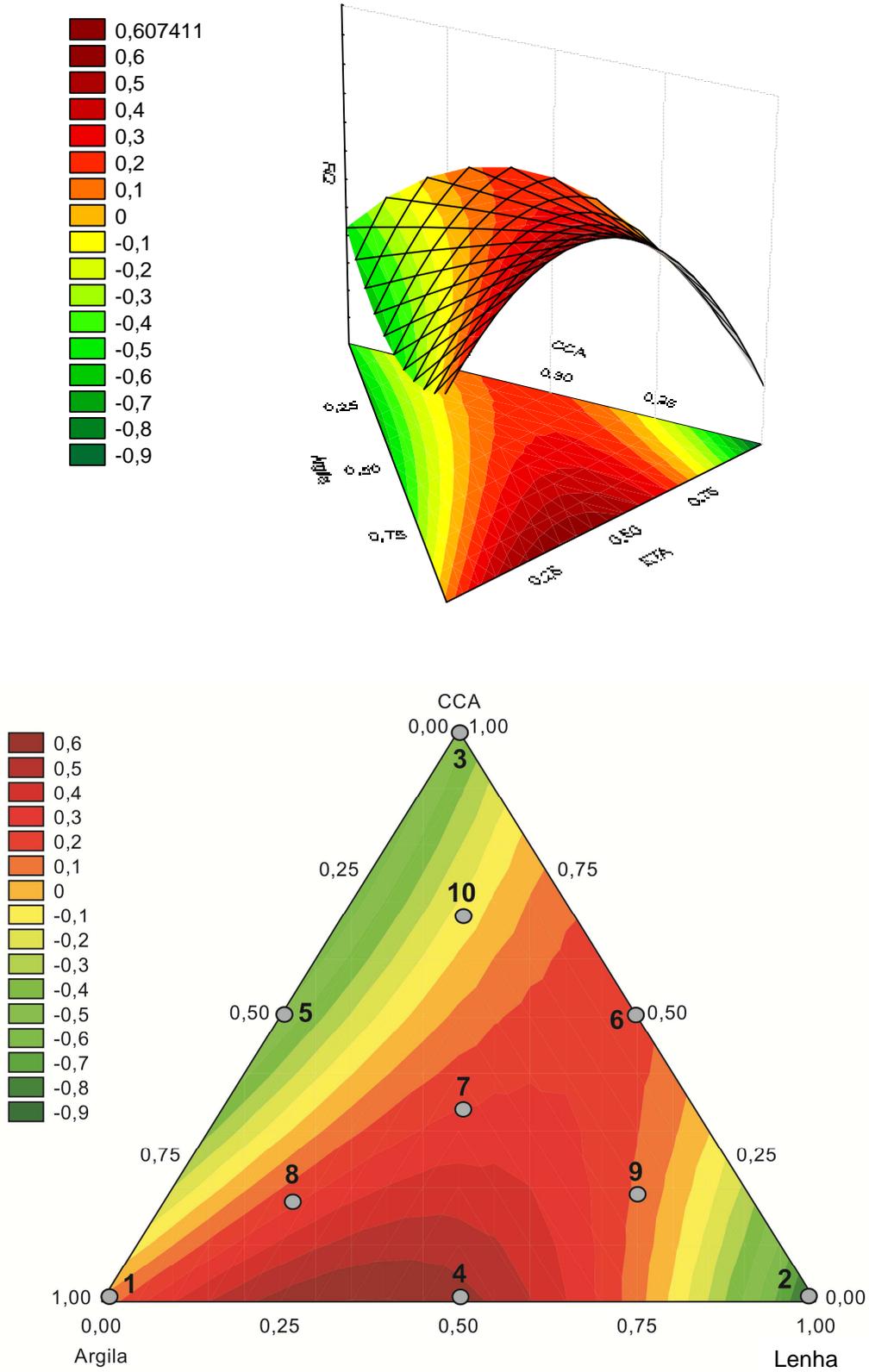


Figura 6.23 – Superfícies de resposta para a retração após queima a 900 °C para a composição B

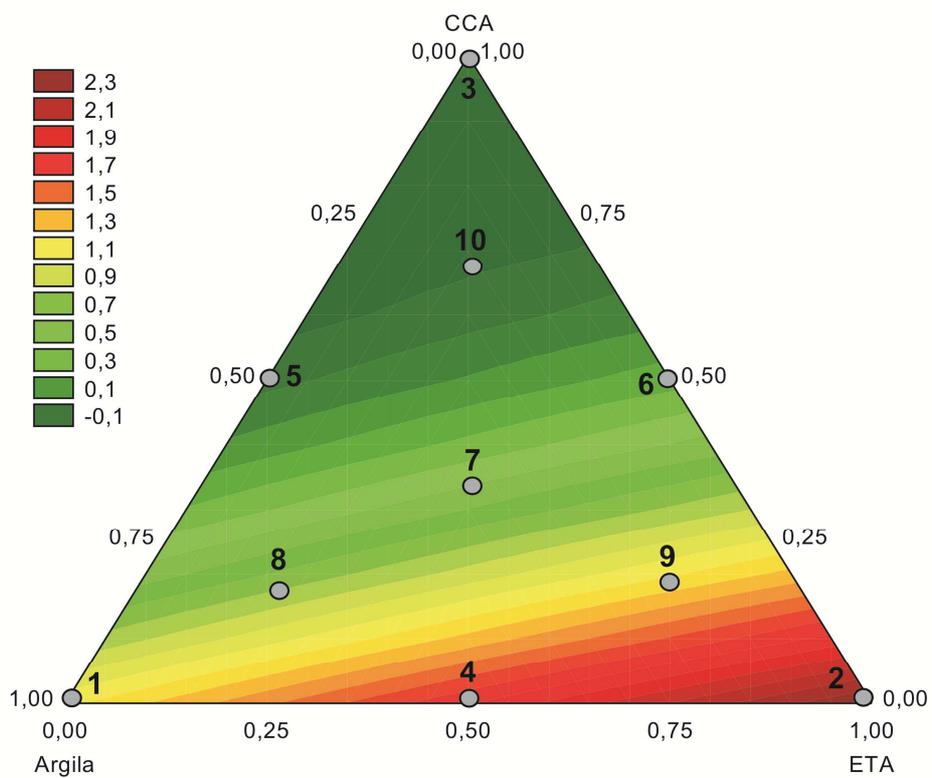
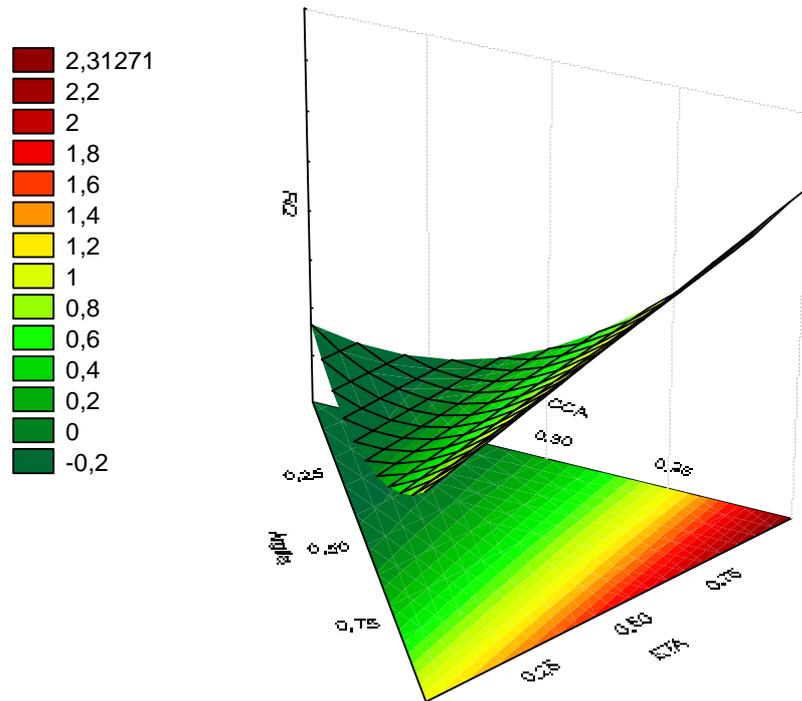


Figura 6.24 – Superfícies de resposta para a retração após queima a 1000 °C para a composição A

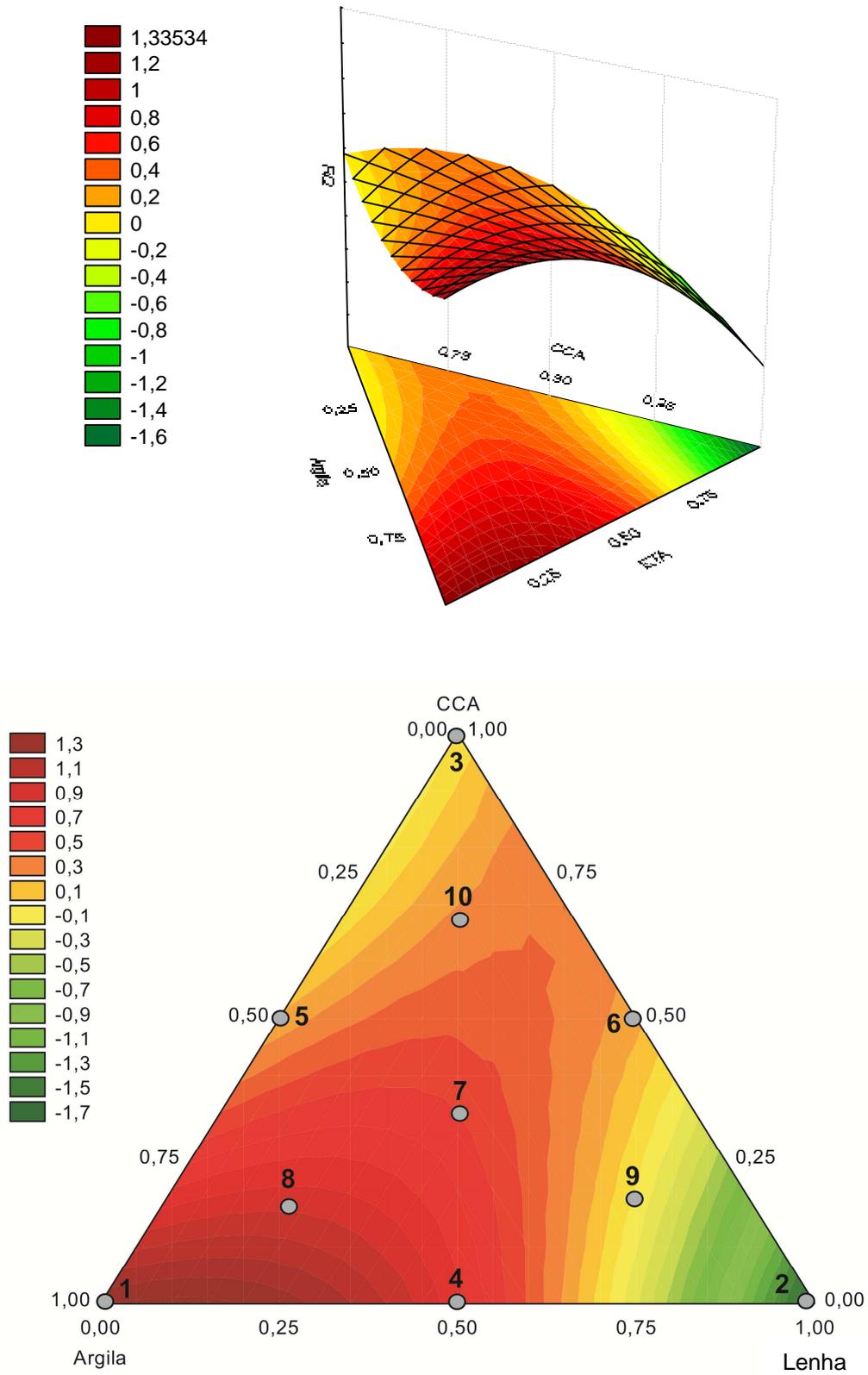


Figura 6.25 – Superfícies de resposta para a retração após queima a 1000 °C para a composição B

#### 6.4.6 – Sobreposição entre a Absorção e o Módulo de Ruptura à Flexão

A Figura 6.26 apresenta as sobreposições das superfícies de resposta da AA e do MRF após a queima a 800 °C para a composição B. Já para a composição A na temperatura de 800 °C, nenhuma mistura no triângulo estudado apresentou MRF superior a 5 MPa. Pode-se observar a região (região hachurada) onde as absorções (valor máximo de 22%) e os módulos de ruptura (valor mínimo de 5,5 MPa) são adequados aos valores previstos na normalização para a produção de blocos cerâmicos conforme a temperatura de queima.

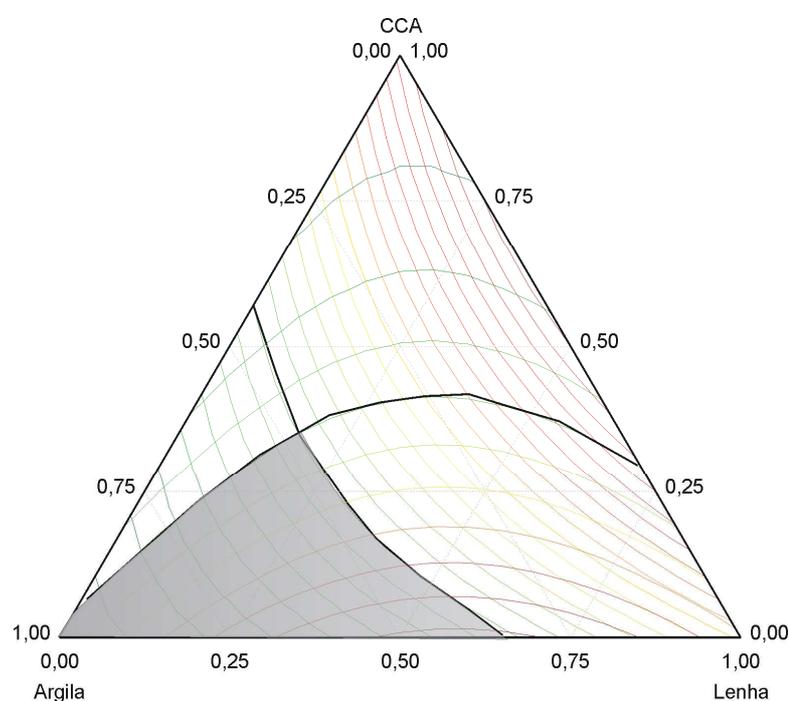


Figura 6.26 - Sobreposição das superfícies de resposta da absorção de água e do módulo de ruptura após queima a 800 °C para a composição B

Através da Figura 6.26 observa-se que após a queima a 800 °C é possível produzir blocos cerâmicos utilizando teores consideráveis de resíduos, como, por exemplo, peças contendo 25% de cinza de lenha e 8,33% de CCA.

Com base na Figura 6.27, verifica-se que a região do diagrama argila-resíduo para a composição A ficou reduzida com a queima a 900 °C, e que para a composição B manteve-se quase constante comparativamente a queima a 800 °C, o que indica a

possibilidade de se incorporar resíduo de cinza de lenha e CCA produzindo corpos com absorções inferiores e maiores módulos de ruptura.

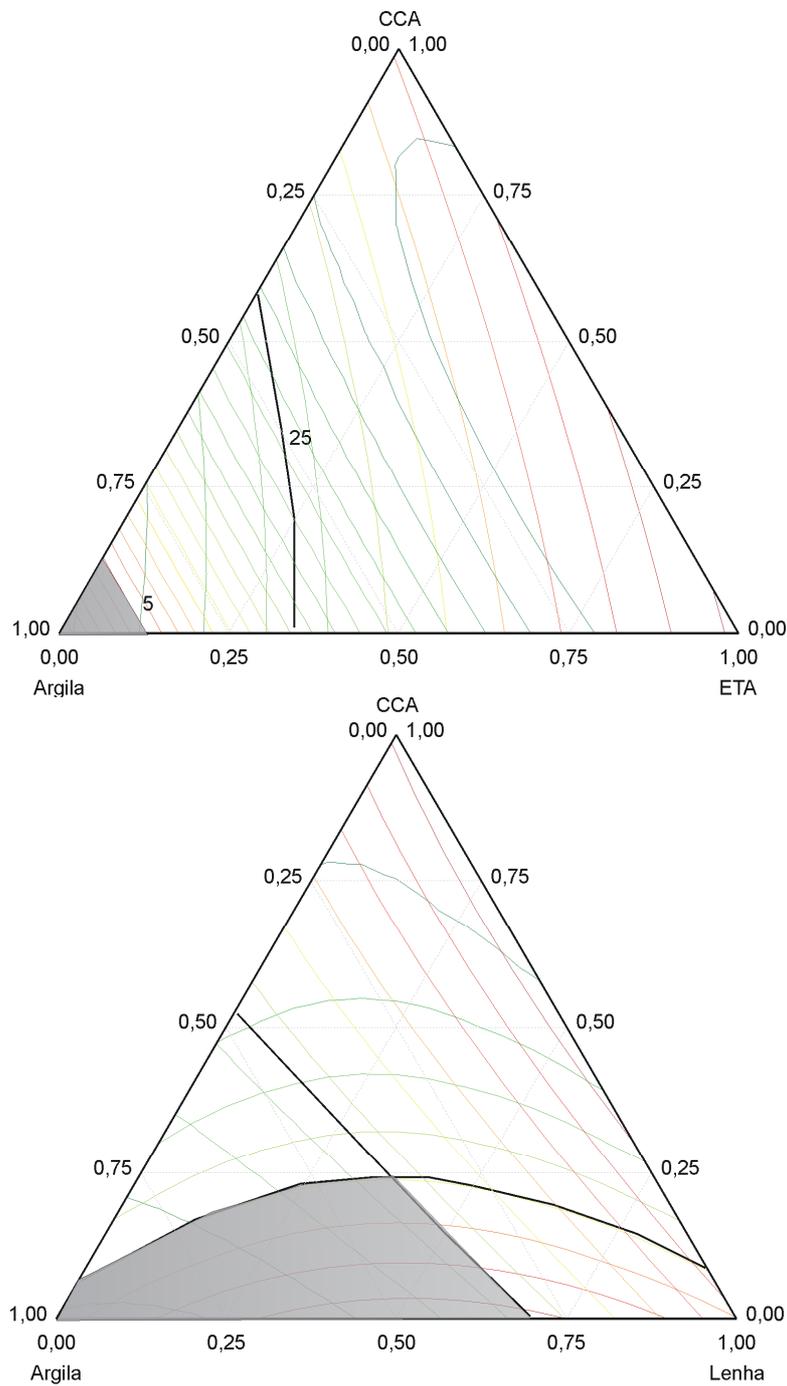


Figura 6.27 - Sobreposição das superfícies de resposta da absorção de água e do módulo de ruptura após queima a 900 °C. a) Composição A. b) Composição B

Na Fig. 6.28 verifica-se que a região hachurada para a composição A teve um incremento com a queima a 1000 °C, e que para a composição B houve um aumento da mesma comparativamente à queima a 900 °C, o que indica ser possível incorporar

elevados teores de resíduo produzindo corpos com absorções inferiores e maiores módulos de ruptura.

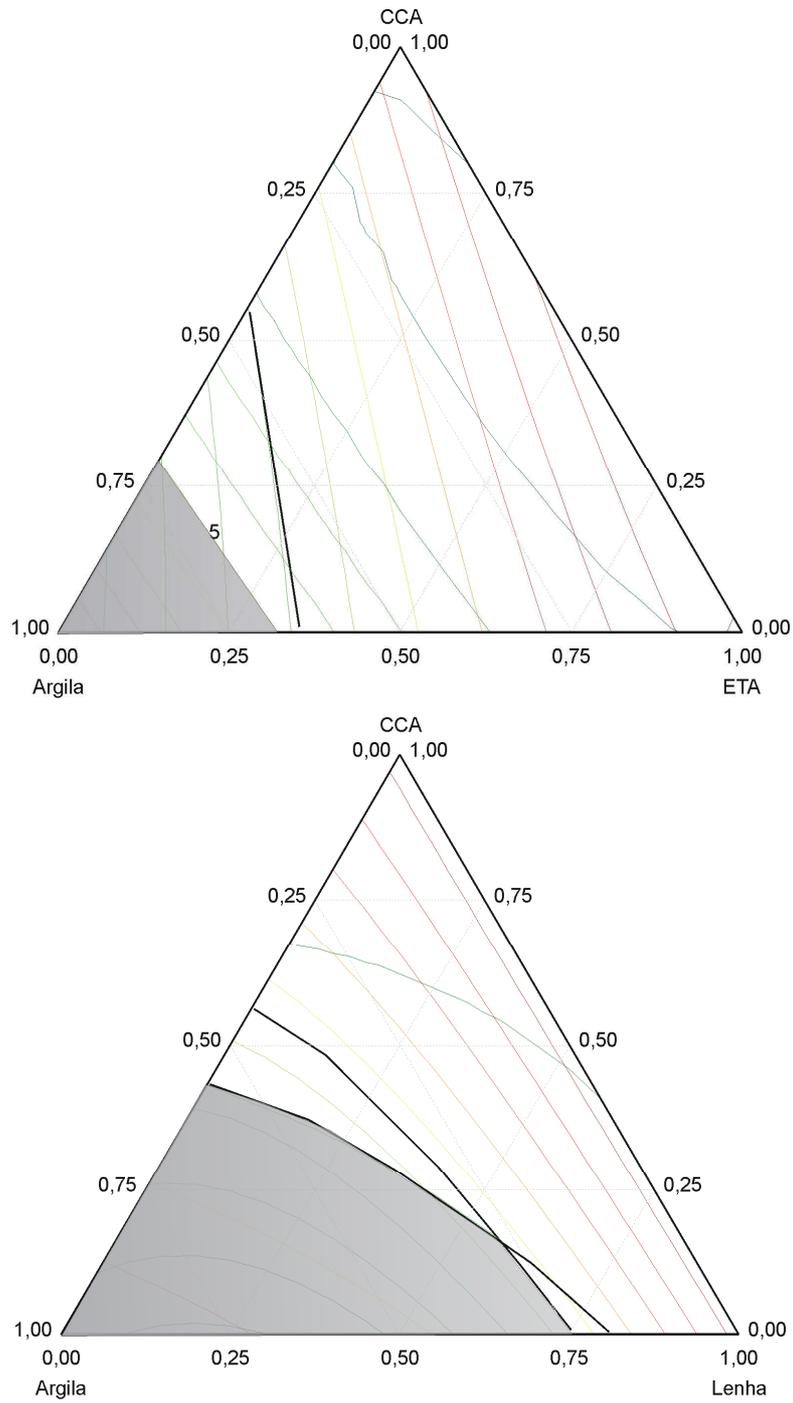


Figura 6.28 - Sobreposição das superfícies de resposta da absorção de água e do módulo de ruptura após queima a 1000 °C. a) Composição A. b) Composição B

## **6.5 – SELEÇÃO DE COMPOSIÇÕES**

A partir dos resultados de sobreposição entre a absorção e o módulo de ruptura à flexão foram selecionadas quatro composições promissoras que utilizam as argilas em maior quantidade em conjunto com um ou dois resíduos na sua formulação. As composições selecionadas foram: a composição A composta por argila e lodo de ETA nas proporções de 95% e 5%, 85% e 15% respectivamente, a composição B-4 composta por argila e cinza de lenha nas proporções de 75% e 25% respectivamente, e a composição B-8 composta por argila, cinza de lenha e CCA nas proporções de 83,33%, 8,33% e 8,33% respectivamente.

## **6.6 – ENSAIOS COMPLETOS**

### **6.6.1 – Moldagem por Prensagem para Revestimento Cerâmico**

A Tabela 6.16 apresenta os resultados das propriedades físico-mecânicas dos corpos-de-prova cerâmicos de 6,0 cm x 2,0 cm x 0,5 cm incorporados com resíduos de CCA, lodo de ETA e cinza de lenha moldados por prensagem após secagem a 110 °C e sinterizados nas temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C.

Nas composições foi utilizada a argila A2 e assim definidas: composição A com 95% de argila e 5% de lodo de ETA, composição B possuindo 75% de argila e 25% de cinza de lenha e composição C com 83,33% de argila, 8,33 de cinza de lenha e 8,33% de CCA.

Os valores máximos de AA foram de 18% (massa incorporada com 25% de cinza de lenha à 1000 °C); porosidade aparente (Pa) de 30,75% (massa incorporada com 25% de cinza de lenha à 1000 °C); densidade aparente mínima (Da) de 1,52  $\delta/cm^3$  (massa incorporada com 5% de lodo de ETA à 1150 °C) e MRF mínimo de 8,81 MPa (massa incorporada com 25% de cinza de lenha à 1000 °C).

Tabela 6.16 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos-de-prova cerâmicos após moldagem por prensagem

Composição	Temperatura (°C)	AA (%)	Pa (%)	Da ( $\delta/\text{cm}^3$ )	MRF (MPa)
A	1000	10,20	21,26	2,09	20,45
	1100	0,90	2,25	2,49	30,31
	1150	0,07	0,18	1,52	30,55
B	1000	18,00	30,75	1,71	8,81
	1100	17,32	29,36	1,70	9,49
	1150	12,05	21,19	1,76	11,05
C	1000	13,54	25,36	1,87	13,74
	1100	4,69	9,57	2,04	16,24
	1150	1,72	3,35	1,95	18,95

Comparando os valores das propriedades físico-mecânicas com as especificações da ABNT NBR 13818 (1997) apresentadas na Tabela 3.3 anteriormente, verifica-se que: para a temperatura de 1000 °C da composição A e 1100 °C da composição C, os corpos cerâmicos são classificados como material poroso (Grupo BIII) por apresentarem valores de absorção de água inferiores a 20% e módulo de ruptura à flexão entre 15 MPa e 20 MPa. Para as temperaturas de 1100 °C e 1150 °C a classificação obtida para os corpos cerâmicos da composição A é grés (Grupo BIb) por possuir valores de absorção de água inferiores a 3% e módulo de ruptura à flexão entre 30 MPa e 45 MPa. A composição C na temperatura de 1150 °C é classificada como material semi-poroso (Grupo BIIb) por apresentar valores de absorção de água inferior a 10% e módulo de ruptura à flexão entre 18 MPa e 22 MPa.

As Figuras 6.29 a 6.33 apresentam os valores das propriedades físico-mecânicas dos corpos cerâmicos incorporados com resíduos de CCA, lodo de ETA e cinza de lenha para as temperaturas de sinterização de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C, bem como o aspecto visual dos mesmos.

Observando os resultados obtidos na Tabela 6.16 e nas Figuras 6.29 e 6.32, verifica-se que os corpos-de-prova cerâmicos apresentaram um decréscimo dos valores de absorção de água e um aumento da resistência mecânica com a elevação da temperatura. Este

comportamento pode ser justificado pela maior quantidade de fase vítrea durante o processo de sinterização e também com a formação da mulita de acordo com as Figuras 6.39, 6.40 e 6.41.

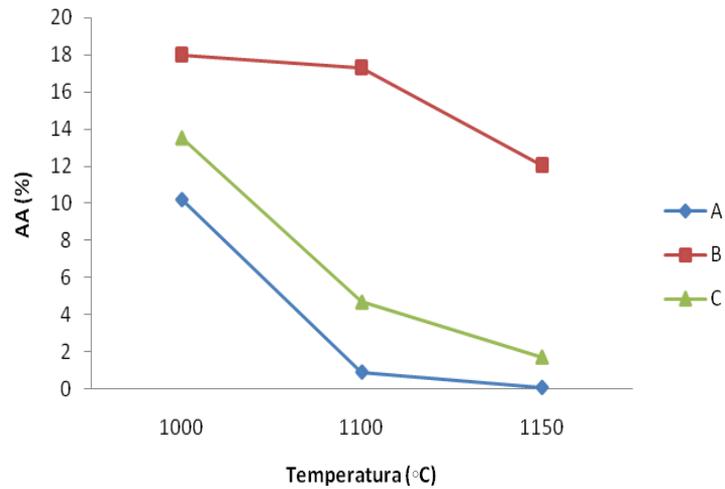


Figura 6.29 – Absorção de água nas composições A, B e C para as temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C

Observando os resultados obtidos na Figura 6.30, verifica-se que os corpos-de-prova cerâmicos apresentaram um decréscimo dos valores de porosidade com o aumento da temperatura. A composição B apresentou maior porosidade se comparada com as demais composições. Este comportamento pode ser justificado pelo elevado teor de óxido de cálcio presente na cinza de lenha.

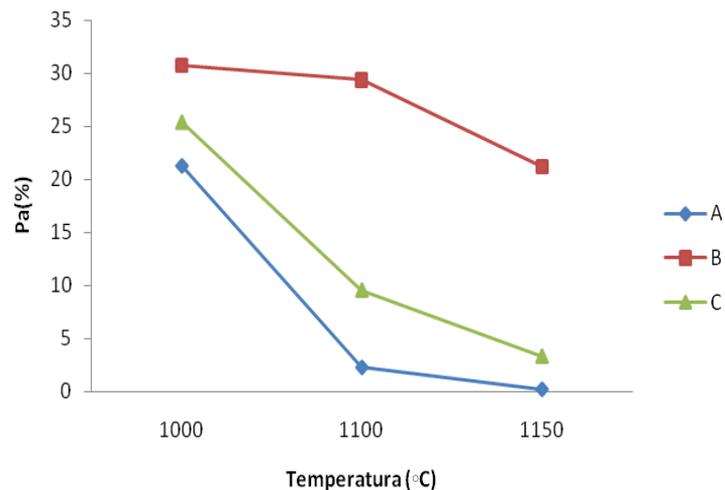


Figura 6.30 – Porosidade aparente nas composições A, B e C para as temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C

A densidade é uma propriedade de grande importância tecnológica já que indica o grau de empacotamento das partículas. Se por um lado uma elevada densidade é favorável aos processos de sinterização, por outro lado, pode ser prejudicial à etapa preliminar de secagem e na eliminação de matéria orgânica nas temperaturas iniciais de queima, devido à redução da permeabilidade das peças cerâmicas.

Observando a Figura 6.31, verifica-se que os valores de densidade aparente dos corpos-de-prova cerâmicos das composições B e C ficaram praticamente inalterados com o aumento da temperatura. Já para a composição A, o aumento da temperatura para 1150 °C ocasionou uma redução significativa da densidade.

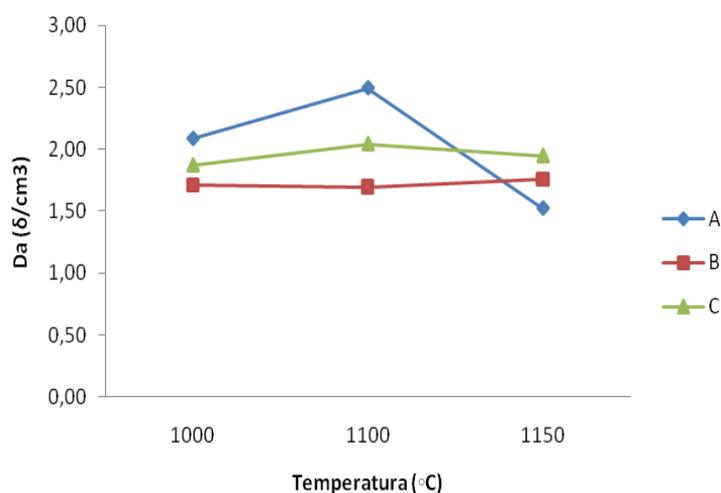


Figura 6.31 – Densidade aparente nas composições A, B e C para as temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C

Observando os resultados obtidos na Figura 6.32, verifica-se que os corpos-de-prova cerâmicos apresentaram um aumento da resistência mecânica com a elevação da temperatura. Este comportamento pode ser justificado pela maior quantidade de fase vítrea durante o processo de sinterização e também com a formação da anortita, feldspato, hemtita e mulita de acordo com as Figuras 6.39, 6.40 e 6.41.

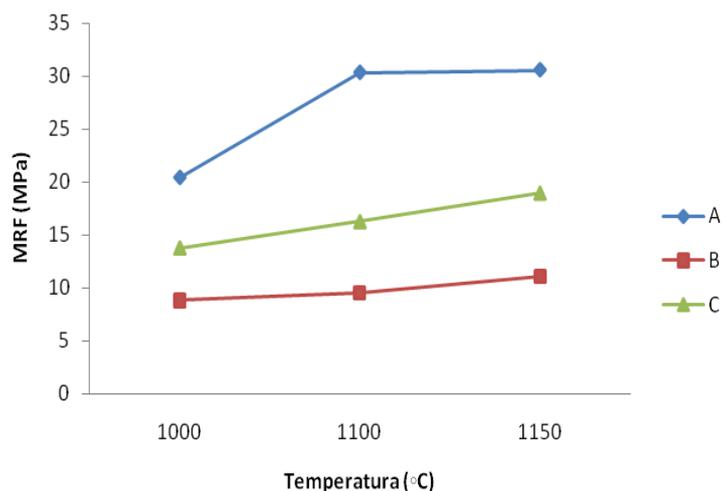


Figura 6.32 – Módulo de ruptura à flexão nas composições A, B e C para as temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C

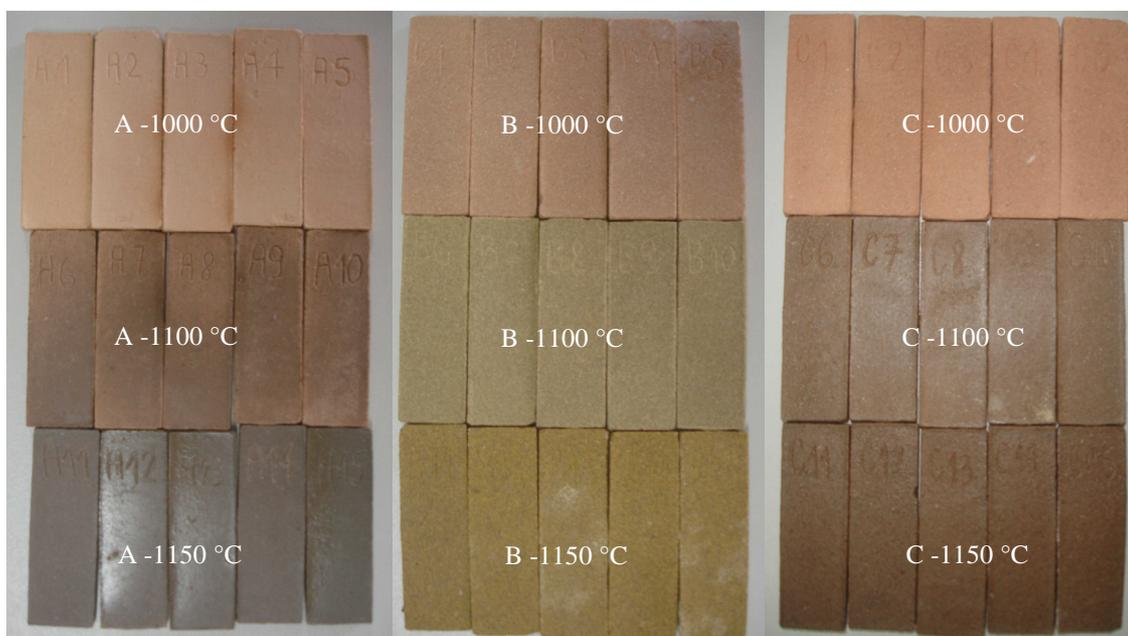


Figura 6.33 – Aspecto visual das composições A, B e C para as temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1150 °C

### 6.6.2 – Moldagem por Extrusão para Blocos Cerâmicos

A Tabela 6.17 apresenta os resultados das propriedades físico-mecânicas dos corpos-de-prova cerâmicos de 10,0 cm x 2,0 cm x 1,0 cm incorporados com resíduos de CCA, lodo de ETA e cinza de lenha moldados por extrusão após secagem a 110 °C e sinterizados nas temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C.

Nas composições foi utilizada a argila A1. As composições foram: composição A com 95% de argila e 5% de lodo de ETA, composição A1 com 85% de argila e 15% de lodo de ETA, composição B possuindo 75% de argila e 25% de cinza de lenha e composição C com 83,33% de argila, 8,33 de cinza de lenha e 8,33% de CCA.

Nos resultados obtidos apresentados na Tabela 6.17, verifica-se que os corpos-de-prova cerâmicos apresentaram valores máximos de absorção de água de 25,15% (massa incorporada com 25% de cinza de lenha à 800 °C); porosidade aparente de 40,27% (massa incorporada com 25% de cinza de lenha à 800 °C); densidade aparente mínima de 1,57  $\delta/\text{cm}^3$  (massa incorporada com 8,33% de CCA e 8,33% de cinza de lenha à 800 °C) e módulo de ruptura à flexão mínimo de 2,91 MPa. (massa incorporada com 8,33% de CCA e 8,33% de cinza de lenha à 800 °C).

Comparando os valores das propriedades físico-mecânicas com as especificações da ABNT NBR 15270 (2005), verifica-se que: para a temperatura de 800 °C em todas as composições, os corpos cerâmicos não atingiram os valores mínimos do módulo de ruptura à flexão de 5,5 MPa de acordo com o especificado por Salge & Barzaghi (1982) para blocos cerâmicos furados. A composição B na temperatura de 900 °C apresentou valor acima do limite máximo estabelecido pela norma de 22% para absorção de água.

Observa-se que para as temperaturas de 900 °C e 1000 °C em todas as composições, exceto a composição B, os corpos-de-prova cerâmicos apresentaram um decréscimo nos valores de absorção de água e ficaram situados no intervalo de 17,26% a 21,94%. Os valores obtidos para o módulo de ruptura à flexão em todas as composições nas temperaturas de 900 °C e 1000 °C obedeceram o especificado por Salge & Barzaghi (1982) e encontrando-se no intervalo de 6,16 MPa a 11,52 MPa.

Tabela 6.17 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos-de-prova cerâmicos após moldagem por extrusão

Composição	Temperatura (°C)	AA (%)	Pa (%)	Da ( $\delta/\text{cm}^3$ )	MRF (MPa)
A	800	17,89	31,60	1,77	4,80
	900	18,50	32,59	1,76	6,16
	1000	17,26	31,30	1,81	11,52
A1	800	13,06	23,70	1,82	4,29
	900	21,12	36,12	1,71	6,40
	1000	20,10	34,76	1,73	8,46
B	800	25,15	40,27	1,60	4,56
	900	23,16	37,60	1,62	5,55
	1000	21,94	35,90	1,61	6,30
C	800	24,42	38,60	1,57	2,91
	900	22,00	37,73	1,66	6,50
	1000	21,20	35,23	1,66	8,05

As Figuras 6.24 a 6.38 apresentam os valores das propriedades físico-mecânicas dos corpos cerâmicos incorporados com resíduos de CCA, lodo de ETA e cinza de lenha para as temperaturas de sinterização de 800 °C, 900 °C e 1000 °C, bem como o aspecto visual dos mesmos.

Observando os resultados obtidos a Tabela 6.17 e nas Figuras 6.24 e 6.37, verifica-se que os corpos-de-prova cerâmicos apresentaram um decréscimo dos valores de absorção de água e o aumento da resistência mecânica com a elevação da temperatura. Este comportamento pode ser justificado pela maior quantidade de fase vítrea durante o processo de sinterização e também com a formação da anortita, hematita e mulita de acordo com as Figuras 6.43, 6.44 e 6.45.

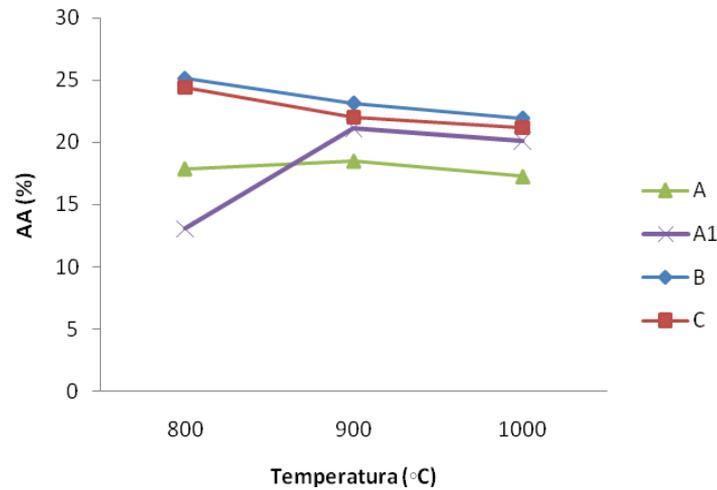


Figura 6.34 – Absorção de água nas composições A, A1, B e C para as temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C

Observando os resultados obtidos na Figura 6.35, verifica-se que os corpos-de-prova cerâmicos apresentaram um decréscimo dos valores de porosidade com o aumento da temperatura. Os materiais cerâmicos apresentam alta porosidade, com pouca formação da fase vítrea, decorrente das baixas temperaturas de queima.

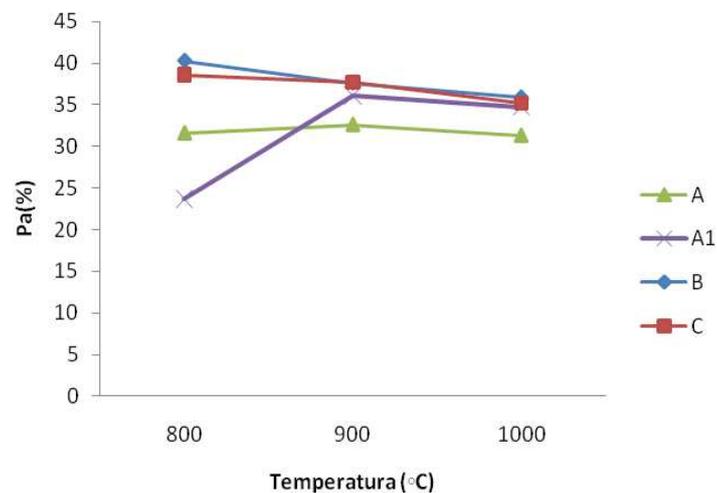


Figura 6.35 – Porosidade aparente nas composições A, A1, B e C para as temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C

Observando os resultados obtidos na Figura 6.36, verifica-se que os corpos-de-prova cerâmicos apresentaram diferentes comportamentos para a densidade com o aumento da temperatura. De uma forma geral, os resíduos contribuíram para melhorar o

empacotamento das partículas, conforme pode ser afirmado através dos valores de densidade obtidos para as diversas massas.

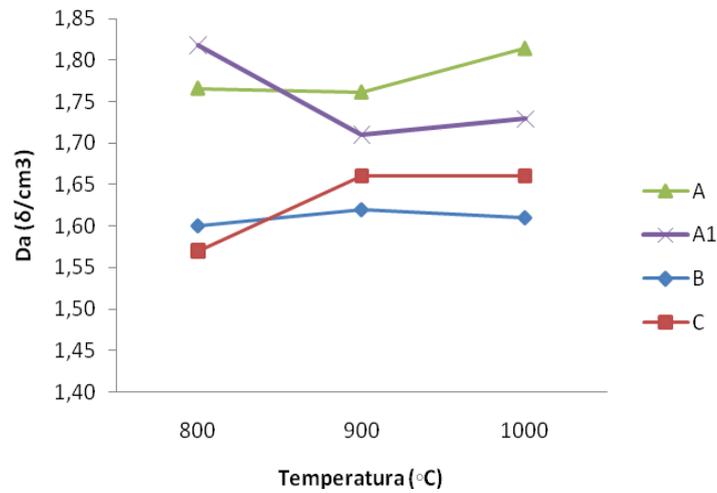


Figura 6.36 – Densidade aparente nas composições A, A1, B e C para as temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C

Observando os resultados obtidos na Figura 6.37, verifica-se que os corpos-de-prova cerâmicos apresentaram um aumento da resistência mecânica com a elevação da temperatura. Este comportamento pode ser justificado pela maior quantidade de fase vítrea durante o processo de sinterização e também com a formação da anortita e mulita de acordo com as Figuras 6.42, 6.43, 6.44 e 6.45.

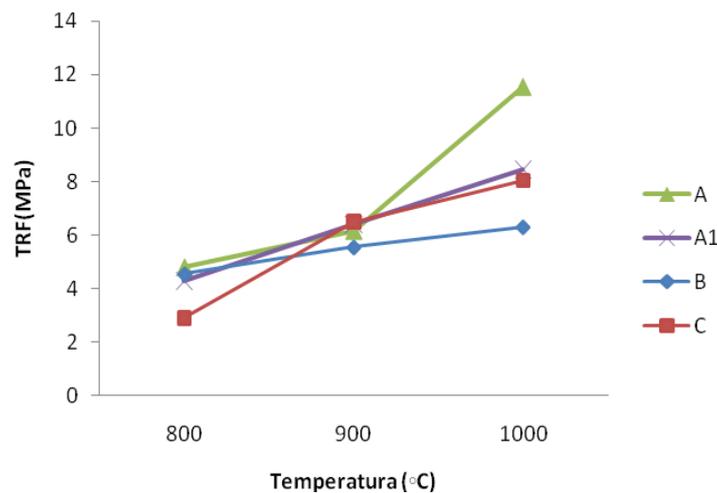


Figura 6.37 – Módulo de ruptura à flexão nas composições A, A1, B e C para as temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C



Figura 6.38 – Aspecto visual dos corpos-de-prova incorporados com resíduos e conformados pelo processo de extrusão

### 6.6.3 – Análise por Difração de Raios X das Composições

A Figura 6.39 apresenta o difratograma de raios X da composição A para revestimento cerâmico sinterizada na temperatura de 1150 °C.

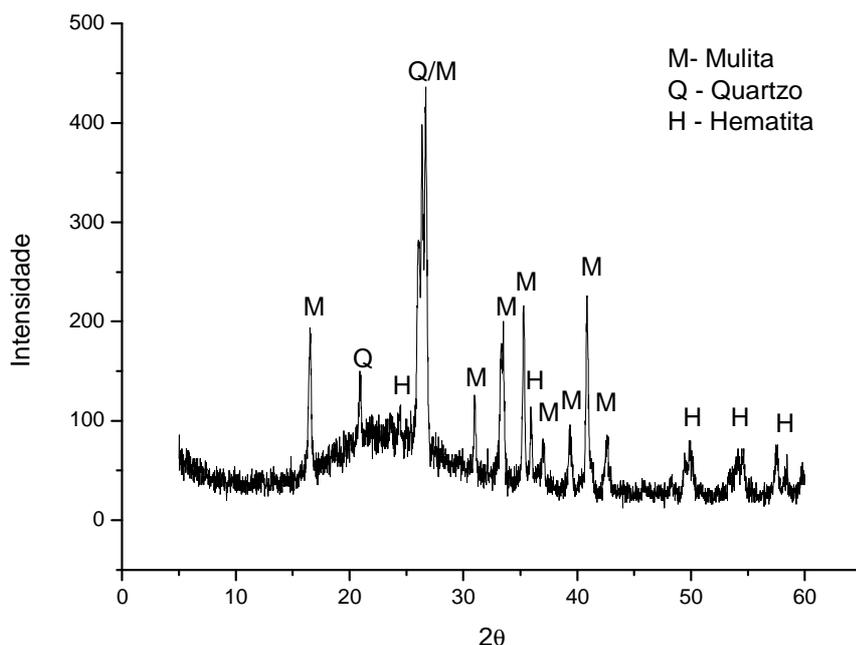


Figura 6.39 – Difratoograma de raios X da composição A na temperatura de 1150 °C

Analisando os resultados obtidos na Figura 6.39, verifica-se que os corpos-de-prova sinterizados na temperatura de 1150 °C apresentam as seguintes fases mineralógicas com as respectivas distâncias interplanares: mulita ( $d = 5,37\text{Å}$ ,  $d = 3,37\text{Å}$ ,  $d = 2,54\text{Å}$  e  $d = 2,21\text{Å}$ ), quartzo ( $d = 4,24\text{Å}$  e  $d = 3,33\text{Å}$ ) e hematita ( $d = 2,52\text{Å}$ ,  $d = 1,84\text{Å}$ ,  $d = 1,69\text{Å}$ ,  $d = 1,60\text{Å}$ ). A fase formada mulita justifica o acréscimo no comportamento mecânico dos corpos cerâmicos. A presença da hematita nos corpos-de-prova confeccionados com a argila A2 foi propiciada provavelmente pela maior porcentagem de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o que propicia uma coloração mais avermelhada.

Na Figura 6.40 é apresentado o difratograma de raios X da composição B para revestimento cerâmico sinterizada na temperatura de 1150 °C.

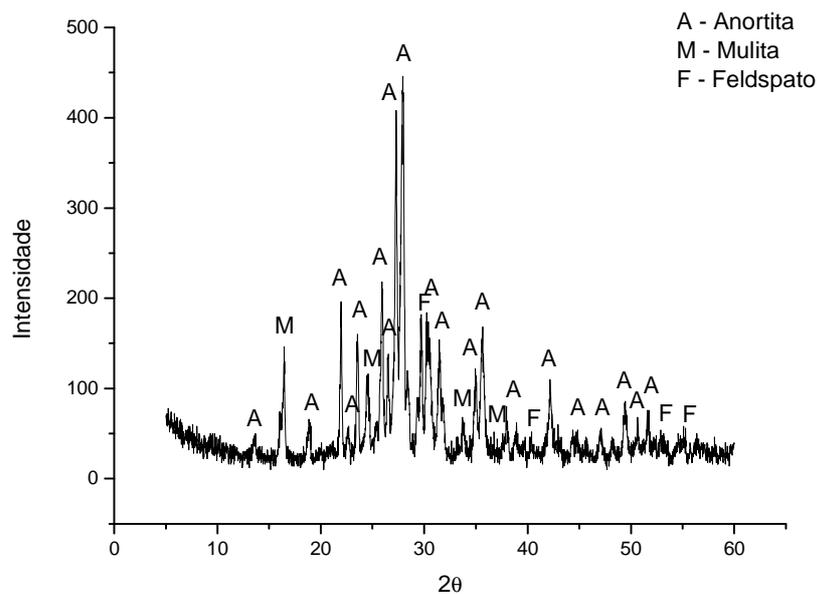


Figura 6.40 – Difratoograma de raios X da composição B na temperatura de 1150 °C

Analisando os resultados obtidos na Figura 6.40, verifica-se que os corpos-de-prova sinterizados na temperatura de 1150 °C apresentam as seguintes fases mineralógicas com as respectivas distâncias interplanares: anortita ( $d = 3,19\text{Å}$ ,  $d = 3,27\text{Å}$ ,  $d = 4,04\text{Å}$  e  $d = 2,51\text{Å}$ ), mulita ( $d = 5,37\text{Å}$  e  $d = 3,37\text{Å}$ ) e feldspato ( $d = 2,99\text{Å}$  e  $d = 2,23\text{Å}$ ). A fase formada mulita justifica o acréscimo no comportamento mecânico dos corpos cerâmicos. A anortita é uma fase cristalina tipicamente encontrada nas matérias-primas utilizadas pelas indústrias cerâmicas.

Na Figura é 6.41 apresentado o difratograma de raios X da composição C para revestimento cerâmico sinterizada na temperatura de 1150 °C.

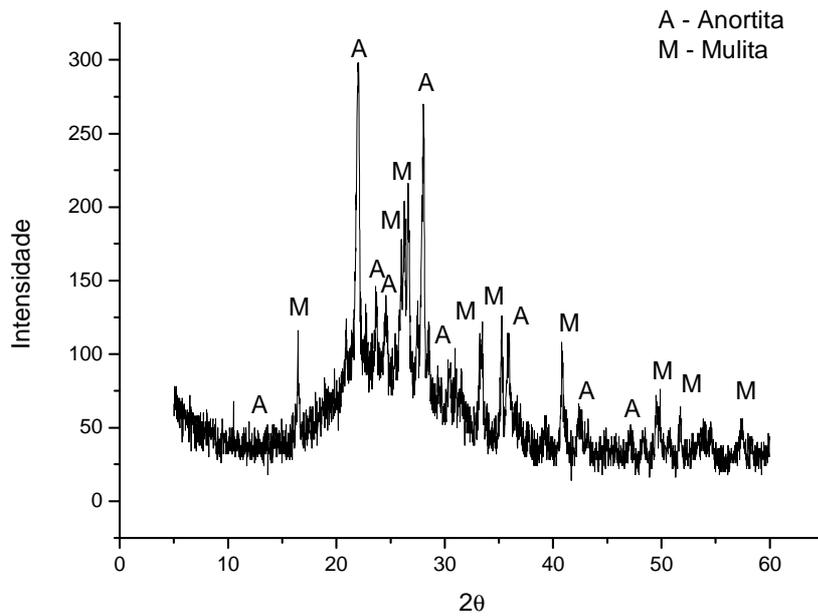


Figura 6.41 – Difratoograma de raios X da composição C na temperatura de 1150 °C

Analisando os resultados obtidos na Figura 6.41, verifica-se que os corpos-de-prova sinterizados na temperatura de 1150 °C apresentam as seguintes fases mineralógicas com as respectivas distâncias interplanares: anortita ( $d = 4,02\text{Å}$ ,  $d = 3,19\text{Å}$  e  $d = 2,49\text{Å}$ ) e mulita ( $d = 3,37\text{Å}$ ,  $d = 3,44\text{Å}$  e  $d = 2,54\text{Å}$ ). A fase formada mulita justifica o acréscimo no comportamento mecânico dos corpos cerâmicos. A anortita é uma fase cristalina tipicamente encontrada nas matérias-primas utilizadas pelas indústrias cerâmicas.

Na Figura 6.42 é apresentado o difratograma de raios X da composição A para blocos cerâmicos sinterizada na temperatura de 1000 °C.

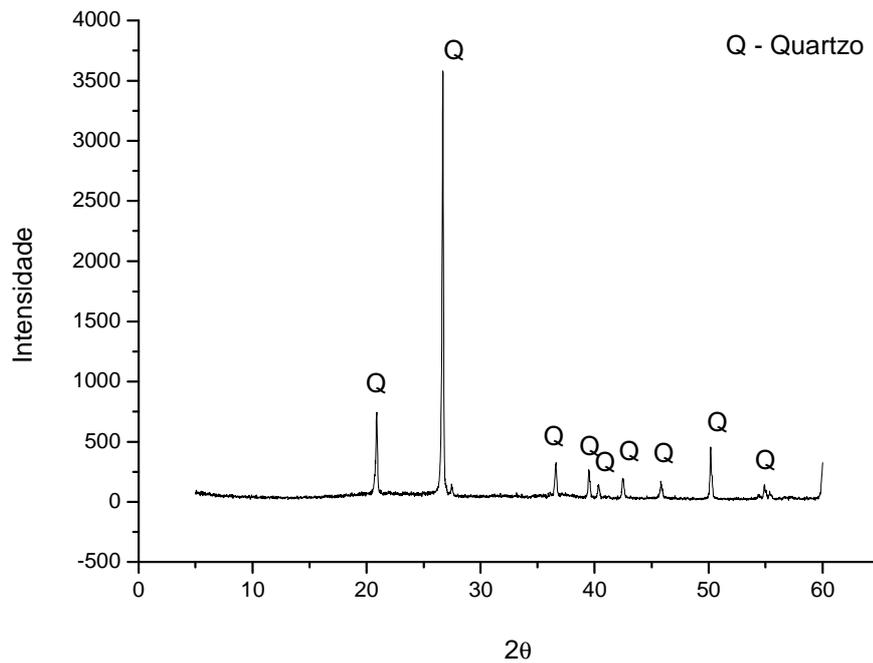


Figura 6.42 – Difratoograma de raios X da composição A na temperatura de 1000 °C

Analisando os resultados obtidos na Figura 6.42, verifica-se que os corpos-de-prova sinterizados na temperatura de 1000 °C apresentam apenas quartzo em sua composição com distâncias interplanares de  $d = 3,33\text{Å}$ ,  $d = 4,24\text{Å}$  e  $d = 1,81\text{Å}$ . O quartzo é uma fase cristalina tipicamente encontrada nas matérias-primas utilizadas pelas indústrias cerâmicas.

Na Figura 6.43 é apresentado o difratograma de raios X da composição A1 para blocos cerâmicos sinterizada na temperatura de 1000 °C.

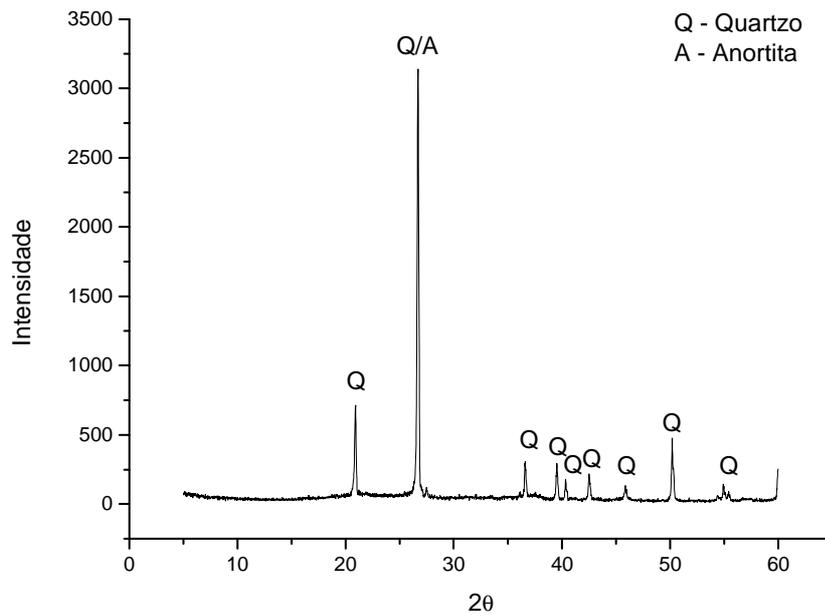


Figura 6.43 – Difratoograma de raios X da composição A1 na temperatura de 1000 °C

Analisando os resultados obtidos na Figura 6.43, verifica-se que os corpos-de-prova sinterizados na temperatura de 1000 °C apresenta as seguintes fases mineralógicas com as respectivas distâncias interplanares: quartzo ( $d = 3,33\text{Å}$ ,  $d = 4,24\text{Å}$  e  $d = 1,81\text{Å}$ ) e anortita ( $d = 3,19\text{Å}$ ). A anortita e o quartzo são fases cristalinas tipicamente encontradas nas matérias-primas utilizadas pelas indústrias cerâmicas.

Na Figura 6.44 é apresentado o difratograma de raios X da composição B para blocos cerâmicos com sinterização na temperatura de 1000 °C.

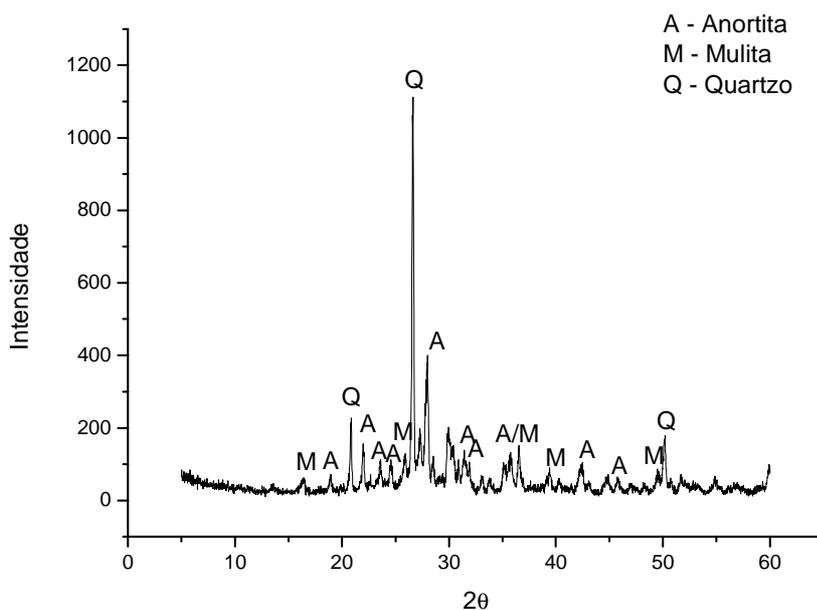


Figura 6.44 – Difratoograma de raios X da composição B na temperatura de 1000 °C

Analisando os resultados obtidos na Figura 6.44, verifica-se que os corpos-de-prova sinterizados na temperatura de 1000 °C apresenta as seguintes fases mineralógicas com as respectivas distâncias interplanares: anortita ( $d = 4,02\text{Å}$ ,  $d = 3,19\text{Å}$  e  $d = 2,49\text{Å}$ ), mulita ( $d = 5,37\text{Å}$ ,  $d = 3,37\text{Å}$ ,  $d = 2,54\text{Å}$  e  $d = 2,21\text{Å}$ ) e quartzo ( $d = 3,33\text{Å}$ ,  $d = 4,24\text{Å}$  e  $d = 1,81\text{Å}$ ). A fase formada mulita justifica o acréscimo no comportamento mecânico dos corpos cerâmicos. A anortita e o quartzo são fases cristalinas tipicamente encontradas nas matérias-primas utilizadas pelas indústrias cerâmicas.

Na Figura 6.45 é apresentado o difratoograma de raios X da composição C para blocos cerâmicos com sinterização na temperatura de 1000 °C.

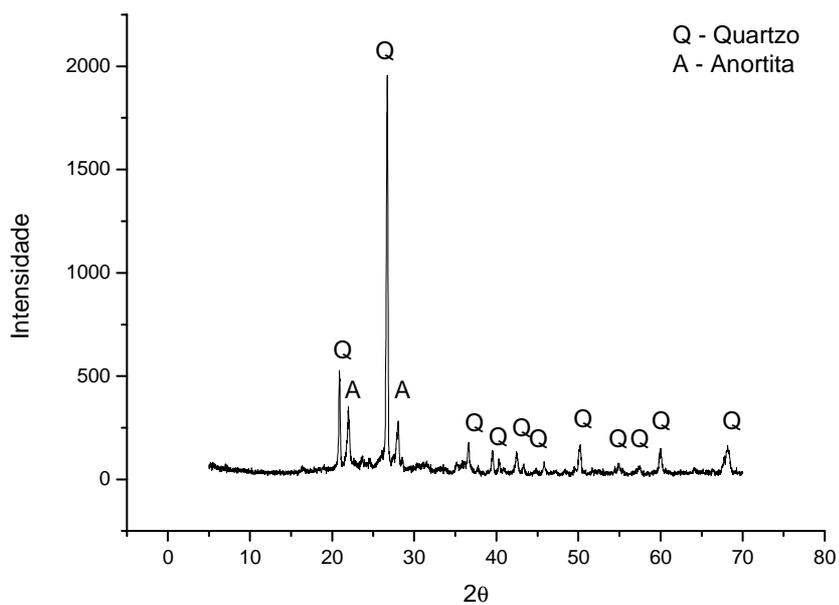


Figura 6.45 – Difratoograma de raios X da composição C na temperatura de 1000 °C

Analisando os resultados obtidos na Figura 6.45, verifica-se que os corpos-de-prova sinterizados na temperatura de 1000 °C apresenta as seguintes fases mineralógicas com as respectivas distâncias interplanares: anortita ( $d = 4,02\text{\AA}$ ,  $d = 3,19\text{\AA}$  e  $d = 2,49\text{\AA}$ ) e quartzo ( $d = 3,33\text{\AA}$ ,  $d = 4,24\text{\AA}$  e  $d = 1,81\text{\AA}$ ). A anortita e o quartzo são fases cristalinas tipicamente encontradas nas matérias-primas utilizadas pelas indústrias cerâmicas.

## **7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **7.1 – CONCLUSÕES**

Esse trabalho teve por objetivo avaliar a potencialidade do uso conjunto dos resíduos de CCA, lodo de ETA e cinza da lenha para o uso como matérias-primas cerâmicas para produção de blocos e revestimentos cerâmicos. Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

#### **7.1.1 – Caracterização Ambiental**

Com relação à caracterização ambiental a CCA, o lodo ETA e a cinza de lenha foram classificados como Classe II A (Não Inerte).

#### **7.1.2 – Caracterização Físico-Mineralógica**

- a) Os resíduos estudados apresentaram composição granulométrica adequada para uso como matérias-primas cerâmicas
- b) As argilas 1 e 2 apresentaram distribuição granulométrica compatíveis para o uso em cerâmica vermelha para produção de blocos e revestimentos cerâmicos;
- c) O lodo de ETA estudado apresentou composição química com teor elevado de ferro apresentando coloração vermelha após sinterização a 800 °C;
- d) Os resíduos estudados apresentaram as seguintes fases mineralógicas: mica, caulinita, quartzo, cristobalita, gibsitita, óxido de cálcio e aluminato de magnésio.

## **7.2 – DELINEAMENTO DE MISTURAS: ESTUDO ESTATÍSTICO**

- a) O delineamento de misturas mostrou-se adequado para a obtenção de modelos matemáticos, estatisticamente significativos, que relacionam as propriedades físico-mecânicas com as proporções das matérias-primas utilizadas;
- b) O procedimento de planejamento experimental utilizado permitiu maximizar a quantidade de resíduo incorporado às formulações para blocos e revestimentos cerâmicos e minimizar o tempo de estudo para a otimização das quantidades de resíduos frente às propriedades do produto final;
- c) A otimização do planejamento experimental é de grande importância para o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem, que em geral vem sendo realizadas de forma empírica, e que ganham a cada dia mais importância para o melhor aproveitamento de resíduos.

## **7.3 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA**

### **7.3.1 – Revestimentos Cerâmicos**

- a) As massas cerâmicas incorporadas com resíduos apresentaram resultados compatíveis com as especificações da ABNT para uso em piso cerâmico com exceção do resíduo da cinza da lenha;
- b) Os pisos cerâmicos incorporados com resíduos foram classificados de acordo com as especificações da ABNT NBR 13818 (1997), como material poroso (Grupo BIII) para as temperaturas de 1000 °C e 1100 °C, semi-poroso (Grupo BIIb) para a temperatura de 1150 °C e grés (Grupo BIb) para as temperaturas de 1100 °C e 1150 °C;
- c) Os revestimentos cerâmicos após queima na temperatura de 1150 °C apresentaram as seguintes fases mineralógicas: anortita, hematita, quartzo e mulita.

### 7.3.2 – Blocos Cerâmicos

- a) Com base na norma ABNT 15270 (2005) e pelos limites preconizados por Salge & Barzagli (1982), todas as composições com até 25% de resíduos após a sinterização nas temperaturas de 900 °C e 1000 °C apresentaram potencial de utilização em blocos e telhas cerâmicas;
- b) Dentre todas as composições encontradas no triângulo da superfície de resposta, as composições binárias A e A1 nas temperaturas de 900 °C e 1000 °C e B na temperatura de 1000 °C, além da composição ternária C nas temperaturas de 900 °C e 1000 °C são bastante promissoras, pois atenderam as normas vigentes para a produção de blocos cerâmicos;
- c) Os blocos cerâmicos após queima na temperatura de 1150 °C apresentaram as seguintes fases mineralógicas: anortita, quartzo e mulita.

### 7.4 – CONCLUSÃO FINAL

Os resultados obtidos mostram a importância do estudo de massas cerâmicas com a incorporação de resíduos e a viabilidade na obtenção de composições com comportamento físico-mecânico satisfatório, de acordo com as especificações vigentes atualmente para a utilização na produção de blocos e revestimentos cerâmicos.

Nos ensaios preliminares observou-se que para a composição A o incremento de lodo de ETA aumenta a retração, enquanto que a CCA possibilita uma melhora nesta propriedade para as temperaturas de 900 °C e 1000 °C. Em relação a composição B, verificou-se que com a adição de cinza de lenha nas temperaturas 900 °C e 1000 °C acarretou uma discreta melhora da retração, e o acréscimo de CCA na temperatura de 1000 °C aumentou esta propriedade.

As composições que apresentaram um maior potencial de utilização foram: a composição A na temperatura de 1100 °C e 1150 °C e a composição C na temperatura de 1150 °C por apresentarem elevada resistência mecânica e baixa absorção para revestimentos cerâmicos e assim classificadas como grés e material semi-poroso

respectivamente. Já para blocos cerâmicos as composições A, A1, B e C na temperatura de 1000 °C foram as que apresentaram melhores resultados de AA e MRF.

Além dos resíduos analisados neste trabalho poderem ser uma alternativa para a redução de custos, os mesmos não possuem uso industrial significativo, também representam uma solução ambientalmente adequada por possibilitar o seu aproveitamento de forma a garantir a redução do potencial de poluição em áreas degradadas.

O estudo desenvolvido com as composições incorporadas com resíduos poderá trazer inúmeros benefícios às indústrias cerâmicas de forma geral, visto que atualmente as jazidas de argila se encontram em escassez em determinadas regiões do Brasil.

Este estudo que se estende desde os ensaios de caracterização físico-mineralógicos, seguido pelos ensaios tecnológicos em escala de laboratório e piloto, necessita ser complementado, para que sua utilização em escala industrial possa ser adequadamente conduzida de forma a solucionar problemas específicos do processamento industrial impossíveis de serem previstos nesta etapa prévia que tradicionalmente antecede seu uso corrente na de produção industrial.

## **7.5 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Visando contribuir para pesquisas futuras que permitam a continuação dos estudos de composições formuladas com as argilas e os resíduos de CCA, lodo de ETA e cinza de lenha, pode-se sugerir os seguintes pontos:

- estudar a viabilidade econômica da aplicação das composições de argilas e resíduos que atenderam às normas vigentes;
- realizar um estudo piloto em uma indústria cerâmica para se verificar a possibilidade da utilização das composições ótimas in loco;
- analisar as composições estudadas com outras temperaturas de sinterização para revestimento e blocos cerâmicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. Cerâmica no Brasil. Disponível em: [http://www.abceram.org.br/asp/abc\\_21.asp](http://www.abceram.org.br/asp/abc_21.asp). Acesso em: 14 abril 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

\_\_\_\_\_ **NBR 15270-1/2005**. Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ **NBR 10004**. Resíduos Sólidos. 2004.

\_\_\_\_\_ **NBR 10005**. Lixiviação de resíduos. 2004.

\_\_\_\_\_ **NBR 10006**. Solubilização de Resíduos. 2004.

\_\_\_\_\_ **NBR 10007**. Amostragem de Resíduos. 2004.

\_\_\_\_\_ **NBR 13818**. Placas Cerâmicas para Revestimento — Especificação e Métodos de Ensaio, Rio de Janeiro, 1997.

AINETO, M.; ACOSTA, A.; IGLESIAS, I. Journal of the European Ceramic Society, (2006) In Press.

ALEXANDRE, J.; TOLEDO, R.; SABOYA, F.; PEREIRA, M. Utilização de Planejamento em Rede Simplex na Previsão de Propriedades Mecânicas de Peças Cerâmicas Vermelhas. **Cerâmica** 47 (303), 170 (2001).

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI E. S.; HOPPEN, C.; TAMANINI, C. R.; NEVES, P.S. Produção, composição e constituição de lodo de estação de tratamento de água (ETA). p. 29-48. In: ANDREOLI, C. V. (coord.) Alternativas de uso de resíduos do saneamento. Curitiba: PROSAB, 2006. 416 p.

ANTUNES, D. L. **Estudo de viabilidade econômica de uma empresa de reciclagem de plásticos de origem industrial**. 2001. 89 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

ARAÚJO, F. S. D.; LEITE, J. Y. P.; ARAÚJO, A. L. C.; ACCHAR, W. Otimização de mistura argila-lodo de ETE para uso em cerâmica estrutural. Anais do 50º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Blumenau, 2002.

- ARKHIPOV, Z. O.; NEMCHENOK, A.P.; REMPEL. Using waste for the production of ceramic tiles. *Glass and Ceram*, v. 36 (10), 1979, p.588-589.
- ASKELAND, D. R. **The science and engineering of materials**. 2a. ed. London. Chapman & Hall, 1990.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, J.S; BRUNS, R.E. Planejamento e Otimização de Experimentos, 2a Edição, Editora UNICAMP, Campinas, SP, 1996.
- BARROS, R. T. de V. Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para Municípios, 2. Belo Horizonte: Escola de Engenharia - UFMG, 1995, p. 63-65.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 705 p.
- BORLINI, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F. et al. Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha, parte I: características da cinza. *Cerâmica*, v. 51, n. 319, p 192-196, 2005.
- BORLINI, M. C.; VIEIRA, C. M. F.; PINATTI, D. G. et al. Análise microestrutural de cerâmica vermelha incorporada com cinza de lenha de eucalipto. *Anais do 50º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, Blumenau, 2006.
- BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. **Cerâmica Industrial**, 5 (3) Maio/Junho, 2000.
- Brasil (1981). Lei 6.938, de 31/08/1981. “Dispõe sobre a política nacional do meio ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e de outras providências”. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 13/02/1998.
- Brasil (1998). Lei 9.605, de 12/02/1997. “Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras 108 providências.” *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 13/02/1998.
- CALDERONI, S. **Os Bilhões Perdidos no Lixo**. 2 ed .São Paulo. Ed: Humanitas/FFLCH/USP. 1998.
- CALLISTER, W. D. Jr. **Materials science and engineering: an introduction**. 2ª. ed. New York. John Wiley & Sons, 1991
- CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 5ª. ed. Rio de Janeiro. LTC, 2002.

- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações fundamentais**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. v. 1. 498 p.
- CARDOSO, A. P. **Tecnologia da cerâmica vermelha do Norte do Paraná aplicada na produção de componente para alvenaria estrutural**. 1995. 139 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
- CASAGRANDE M. N., **Efeito da adição de chamote semi-gresificado no comportamento físico de massa cerâmica para pavimento**. 2002. 66 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2002.
- CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Microestrutura dos materiais cerâmicos**. p. 321-349. In: ISAIA, G. C. (ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v.1. 416 p.
- CHANG, A. C.; PAN, G.; PAGE, A. L.; ASANO, T. **Developing Human Health-related Chemical Guidelines for Reclaimed Waster and Sewage Sludge Applications in Agriculture**. California: Wealth Human Organization, 2001. 94 p. Disponível em <[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/wastewater/gwwuchemicals.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gwwuchemicals.pdf)>. Acessado em 09 de maio de 2009.
- CHERIAF, M.; CAVALCANTE R. J.; PERA, J. **Caracterização dos resíduos industriais do Estado de Santa Catarina e as possibilidades de valorização na construção civil**. In: 1º Encontro sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. Anais, p: 81-86. Canela, 1997.
- CINCOTTO, M. A. **Tecnologia das Edificações**, São Paulo, PINI, 1998.
- COELHO, Cláudio. **Quantificação de fases mineralógicas de matérias-primas cerâmicas via numérica**. 2002. 92 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL (CAESB). Disponível em: <http://www.caesb.df.gov.br>. Acesso em: 22/02/2009.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Disponível em: [http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/estudo\\_safra.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/estudo_safra.pdf). Acesso em: 17/03/2009.
- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resoluções CONAMA: 1984/1986**. Brasília, SEMA, 1986.

- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2005). Resolução nº 357, de 17/03/2005. “Dispõe sobre a Classificação dos corpos d’água e diretrizes Ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes”. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 18/03/2005.
- CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. In: REALI, M. A. P. (coord.) *Noções gerais de tratamento de disposição final de lodos de ETA*. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 1999. P1-19.
- CORNELL, J.A., *Experiments with Mixtures: Designs, Models and the Analysis of Mixture Data*, 3rd edition, New York: John Wiley & Sons, 1990.
- CORREIA, S. L.; GRUN, E.; DENARDI, C. D.; HOTZA, D. & FOLGUERAS, M. V. Aplicação de Delineamento Experimental e Otimização para Avaliar o Efeito de Argilas na Microestrutura e Propriedades Tecnológicas de Composições Cerâmicas, *Anais do 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, São Pedro, SP, 2005.
- COSIN, S.; KOZIEVITCH, V. F. J.; SOUZA SANTOS, P.; VALENZUELA DIAZ, F. R. Estudo e caracterização de lodo de estação de tratamento de água visando a sua utilização na produção de materiais cerâmicos. In: *Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável*. Anais. Florianópolis: ICTR, 2004.
- CURTO, K. A .S.; COSTA, A .F.; REIS, J. P.; CORREIA, S. L; HOTZA, D. Utilização de Experimentos com Misturas na Investigação do Efeito da Composição e da Plasticidade na Resistência Mecânica de Massas Cerâmicas Triaxiais, *Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, João Pessoa, PB, 2003.
- DAFICO, D. A. **Estudo do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz**. 2001. 191 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.
- DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD & RURAL AFFAIRS – DEFRA. *Raising the Quality*. 1998. Disponível em < <http://www.defra.gov.uk/Environment/>> Acessado em 09 de março de 2009.
- DI BERNARDO, L.; SCALIZE, P. S.; SOUZA FILHO, A. G. “Água de Lavagem de Filtros Rápidos.” In: Realí, M.A.P. (coord.) *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 1999. 169-202.
- DONDI, M.; MARSIGLI, B.; FABBRI, B. *Tile & Brick Int.* v.13, 4 (1997) p. 218.

- DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- DUARTE, A. C. L. **Incorporação de lodo de esgoto na massa cerâmica para fabricação de tijolos maciços: uma alternativa para a disposição final de resíduo**. 2008. 109 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- EHRIG, R. J. **"Plastics Recycling: Products and Processes"**. Nova Iorque. Oxford University Press. 1992
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, (FAO). Disponível em: <http://www.fao.org/rice2004/en/aboutiyr.htm>. Acesso em 20 de janeiro de 2009.
- GRAEDEL, T. E.; ALLENBY, B. R. **"Design for Environment"**. Rio de Janeiro. AT&T. Ed: Prentice-Hall do Brasil. 1996.
- GEYER, A. L. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto**. 2001. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.
- GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JR A. D. Desidratação de lodos produzidos em estações de tratamento de água. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 17, 1993, Natal. Anais. Natal: ABES, 1993. V.2, P.324-341.
- GUIMARÃES, G. C. **Estudo do adensamento e desidratação dos resíduos gerados na ETA-Brasília**. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- HAMMER, M. J.; HAMMER JR, M. J. **Water and Wastewater Technology**, 3ª ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1996.
- HENDRIKS, C.F. **The building cycle**. Amsterdam: Aeneas, 2000, 231 p.
- HOFFMANN, R.; JOHN, S. L.; BAVARESCO, M.; SARIORI, T. C. **Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte**. UFSM/RS. 1996.

- INGUNZA, M. P. D.; ANDREOLI, C. V.; NASCIMENTO, R. M.; TINOCO, J. D.; HOPPEN, C.; PEGORINI, E. S. Uso de resíduos do saneamento na fabricação da cerâmica vermelha. p. 283-359. In: ANDREOLI, C. V. (coord.) Alternativas de uso de resíduos do saneamento. Curitiba: PROSAB, 2006. 416 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em:[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa\\_2009\\_7.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_2009_7.shtm). Acessado em: 17/03/2009.
- JONH, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**. Tese de Livre Docência. 102p. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- JUST, M. L. **Utilização da cinza de casca de arroz no processo de moldagem a verde em fundição**. 2000. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.
- KAZMIERCZAK, C. S.; Produtos de cerâmica vermelha. p. 563-585. In: ISAIA, G. C. (ed.) Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. v.1. 416 p.
- KNISS, C. T.; MILANEZ, K. W.; KUHNEN, N. C.; RIELLA, H. G.; SEGADÃES, A. M. In: Fourth International Latin-American Conference on Powder Technology, Guarujá, Brasil (2003).
- MACEDO, R. S. Estudo das matérias-primas e tijolos cerâmicos furados produzidos no estado da Paraíba. 1996, 200 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1996.
- MAGALHÃES, P. F. **Estudo de viabilidade de incorporação de lodo de estação de tratamento de água na produção de cerâmica vermelha**. 2003. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. Advances in Concrete Technology. Vol. 1. CANMET, Canadá, 1996.
- MARTINEZ, R.G. Placas pré-moldadas de argamassa armada e casca de arroz Dissertação (Mestrado). 2003. 89 f. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2003.
- MEDEIROS, E. N. M. **Sistema de gestão da qualidade na indústria cerâmica vermelha. Estudo de caso de uma indústria que abastece o mercado de Brasília**. 2006. 190 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

- MEHTA, P. K. **Rice Husk Ash: A Unique Supplementary Cementing Material**. Advances in Concrete Technology, p 407-431. Ottawa: Canmet, 1992.
- MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. L. L. Utilização de resíduos industriais da produção de agregados na produção de tijolos e telhas. Anais do 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis, 2001.
- MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. L. L. Utilização de resíduos da serragem de granito na fabricação de blocos cerâmicos em escala piloto. Anais do 46º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Paulo, 2002.
- MENEZES, R.R.; NEVES, G.A.; FERREIRA,H.C. 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, 2002.
- MS – Ministério da Saúde. (2004). Portaria nº 518, de 25/03/2004. “Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências.”. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 26/03/2004.
- MORITA, D. M.; SAMPAIO, A. O.; MIKI, M. K.; DAVID, A. C. **Incorporação de lodos de estações de tratamento de água em blocos cerâmicos**. SANEAS, São Paulo, p. 7-12, Outubro. 2002
- MOTTA, J. F. M., JUNIOR, M. C., TANNO, L. C. e ZANARDO, A. *et. al.* As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte II: Os minerais Industriais e as Massas da Cerâmica Tradicional. **Cerâmica Industrial**, v. 7, 2002
- OLIVEIRA, M. R. C. **Caracterização, Classificação e Reciclagem do Resíduo Sólido - Pó de balão - Gerado na indústria siderúrgica de Ferro Gusa não integrada a carvão vegetal e seu aproveitamento Tecnológico na fabricação de tijolos cerâmicos vermelhos para uso na construção civil. Estudo de um caso na região de Sete Lagoas**. 2002. 154 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.
- OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA, J. N. F. **Cerâmica**, abril/junho, v. 50, n. 314, p. 75-80, 2004.
- PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 11. ed. São Paulo: Globo, 1998. 435 p.

- PINATTI, D. G.; CONTE, R. A.; BORLINI, M. C.; SANTOS, B. C.; OLIVEIRA, I.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO S. N. *Journal of the European Ceramic Society*, 26, (2006) 305.
- PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; SALES, A. BARON, O. Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba – Pr. Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental. Joinville, 2003.
- POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 320f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 2006.
- PRACIDELLI, S. Cerâmica vermelha/estrutural. *Cerâmica*, v.27, n.135, p.34-35, março, 1981.
- PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial* 02(01/02): 31-35, 1997.
- PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. **Estudos com cinzas de casca de arroz buscam aproveitamento em concretos de alto desempenho**. Coletânea Habitare: Utilização de resíduos na construção civil. Editora Programa de Tecnologia de Habitação, vol. 4, 2002.
- PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. **Cinzas da casca de arroz**. Coletânea Habitare: Utilização de resíduos na construção civil. Editora Programa de Tecnologia de Habitação, vol. 4, pg. 242-246, Porto Alegre – RS: ANTAC, 2003.
- REALI, M. A. P. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. In: REALI, M. A. P. (coord.) Noções gerais de tratamento de disposição final de lodos de ETA. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 1999. P21-39.
- REED S. J. **Principles of ceramics processing**, 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- RICHERSON D. W. **Modern ceramic engineering**, Marcel Dekker, New York, 1982.
- RICHTER, C. A. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.

- ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. **Aproveitamento de resíduos na construção**. Coletânea Habitar: Utilização de resíduos na construção habitacional. Editora Programa de Tecnologia de Habitação, vol. 4, pg 73-93. ANTAC, Porto Alegre, 2003.
- RUSSELL, J.S.; PECK, B.E. "Process Residuals." In: Hager, L. (ed.) Water Treatment Plant Design. 3ª edição. American Water Works Association/American Society of Civil Engineers. McGraw-Hill, Inc., E.U.A., 1997. 485-530p.
- SALGE, A.; BARZAGHI, L. Resistência à flexão e moldagem de argilas. **Cerâmica**, v.28, n. 151, 1982.
- SANTOS, A. D.. **Estudo da possibilidade de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo**. 2003. 265 f. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. 1997. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- SELHORST, M. **Ensino de normas técnicas para verificação de qualidade de produtos de cerâmica vermelha utilizando sistema especialista**. Dissertação (Mestrado). 2001. 69 f. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.
- SILVA JR., A. P. da; ISAAC, R. de L. Adensamento por gravidade de lodo de ETA gerado em decantador convencional e decantador laminar. In: Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y ambiental, xxviii, 2002, Cancun México. Anais. Cancun: AIDIS, 2002.
- SOUZA, J. – **Estudo da durabilidade de argamassas e blocos para alvenaria não estrutural utilizando cinzas e casca de arroz**. Exame de Qualificação apresentado ao Doutorado de Engenharia de Processos da UFCG. Campina Grande-PB, 2007.
- SOUZA SANTOS, P. **Tecnologia de argilas, aplicação às argilas brasileiras**. São Paulo: Edgard Blucher, 1992, v. 2, 340 p.
- STEIL, O. S. **Energia do gás natural em fornos de cerâmica estrutural**. Florianópolis: SCGÁS, jul. 2000.
- TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. 218 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

- TIBONI, R. **Utilização da cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland.** 2007. 179 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.
- TSUTIYA, M T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do estado de São Paulo. Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, 2001.
- VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos materiais cerâmicos.** Tradução de Cid Silveira e Shiroyuki Oniki. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. 318p.
- VERÇOZA, E. J. **Materiais de construção.** v.1. 3. ed. Porto Alegre: Sagra. 1987. 153p.
- VIEIRA, C. M. F., de HOLANDA, J. N. F. e PINATTI, D. G. Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada a fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ. Cerâmica 46, n. 297, 2000.
- VISCONTE, L. L. Y. **Rejeitos agrícolas em composições poliméricas: cinza da casca de arroz, 2003.** Disponível em: <http://www.ima.ufrj.br/linhaspes/modulo>. Acesso em: 06 novembro 2008.
- WAG, Y. Condicionamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água: estudo de caso. Escola Politécnica USP-São Paulo SP, (1996).p. 1 - 15, 50 – 53