

RECICLAGEM DE RESÍDUO DE VIDRO PLANO EM CERÂMICA
VERMELHA

THAIS CRISTINA DA COSTA CALDAS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JULHO – 2012

RECICLAGEM DE RESÍDUO DE VIDRO PLANO EM CERÂMICA
VERMELHA

THAIS CRISTINA DA COSTA CALDAS

“Dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais”.

Orientador: Carlos Mauricio Fontes Vieira

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JULHO- 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

70/2012

Caldas, Thais Cristina da Costa

Reciclagem de resíduo de vidro plano em cerâmica vermelha /
Thais Cristina da Costa Caldas. – Campos dos Goytacazes, 2012.
xiv, 89 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos
Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de
Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2012.

Orientador: Carlos Maurício Fontes Vieira.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

Bibliografia: f. 81-89.

1. CERÂMICA VERMELHA 2. RESÍDUO DE VIDRO
PLANO 3. INCORPORAÇÃO I. Universidade Estadual do
Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e
Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II. Título.

RECICLAGEM DE RESÍDUO DE VIDRO PLANO EM CERÂMICA
VERMELHA

THAIS CRISTINA DA COSTA CALDAS

“Dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais”.

Aprovada em 09 de Julho de 2012.

Comissão Examinadora:

Prof. Jamil Duailibi Filho (D.Sc., Eng. e Ciências dos Materiais) - INT

Prof. Gustavo de Castro Xavier (D.Sc., Eng. Civil) - UENF

Prof. Rubén J. Sánchez Rodriguez (D.Sc., Ciências Químicas) – UENF

Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira (D.Sc., Eng. e Ciências dos Materiais) - UENF

Orientador

"Persistência é o menor caminho para o êxito."

Charles Chaplin

DEDICATÓRIA

Aos meus pais pelo amor, vida, exemplo e educação, a minha irmã pela amizade e força e, ao meu namorado pelo incentivo, apoio e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter permitido mais uma concretização de alegria na minha vida.

Aos meus pais, João e Kátia, por sempre apoiarem minhas escolhas profissionais.

A minha irmã, pois mesmo longe torce e crê por minhas conquistas.

Ao meu namorado Ademar pelo amor, compreensão e incentivo durante todos os momentos vividos.

Ao meu orientador, Carlos Maurício Fontes Vieira, pela orientação durante a realização deste trabalho.

Aos meus amigos da Universidade: Mariane Costalonga, Lara Pessin, Kátia Faria, Laís Motta e Aline Moraes.

Aos amigos de perto e de longe, pelo apoio e preocupação. Obrigada, vocês que aliviaram minhas horas difíceis, me alimentando de certezas, força e alegria.

Ao aluno de graduação Maycon Douglas Licasalio Martins pelo auxílio nos experimentos.

A equipe técnica do LAMAV e LECIV pelo auxílio na consecução dos ensaios.

Ao Senhor Clayton Labes pelas oportunidades e por todo o apoio.

A CAPES pela bolsa de estudo que possibilitou a dedicação a este trabalho.

Muito obrigada nunca será suficiente para demonstrar a grandeza do que recebi de vocês. Peço a Deus que os recompense à altura.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	3
2.1. Objetivos	3
2.2. Justificativas	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Indústria Cerâmica	4
3.1.1. Materiais Cerâmicos.....	4
3.1.2. Propriedades dos materiais cerâmicos.....	5
3.1.3. Matérias-primas.....	6
3.1.3.1. Argilas	6
3.1.3.2. Composição Química das Argilas	7
3.1.3.3. Propriedades das Argilas	8
3.1.4. Cerâmica vermelha	8
3.1.5. Processo de fabricação de cerâmica estrutural.....	9
3.1.5.1. Preparação da massa	9
3.1.5.2. Conformação da peça	10
3.1.5.3. Secagem	10
3.1.5.4. Queima	11
3.1.6. Resíduos da Indústria Cerâmica	11
3.1.6.1. Uso de Resíduos em Cerâmica Vermelha	12
3.2. Vidro	13
3.2.1. Breve Histórico	13
3.2.2. Definição e Tipos de Vidros.....	15
3.2.3. Estrutura do Vidro	17
3.2.4. Propriedades dos Vidros	18
3.2.5. Vidros Planos	21
3.2.5.1. Preparação da Composição	22
3.2.5.2. Fusão da Composição.....	22

3.2.5.3. Conformação	22
3.2.6. Fabricação dos Vidros Planos	22
3.2.7. Perfil do Segmento de Vidros Planos	23
3.3. Resíduos Sólidos	24
3.3.1. Disposição Final do Resíduo Sólido	25
3.3.2. Resíduo de Construção Civil no Brasil	26
3.4. Reciclagem do Vidro	27
3.4.1. Limitações para Reciclagem de Vidros	28
3.5. Trabalhos Científicos Desenvolvidos com Resíduo de Vidros em Material Cerâmico	29
3.6. Trabalhos Científicos Desenvolvidos com Resíduos de Vidros Planos em Cerâmica Vermelha	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.2. Métodos	41
4.2.1. Beneficiamento das Matérias-Primas	41
4.2.2. Caracterização das Matérias-Primas	41
4.2.2.1. Difração de Raios-X (DRX)	41
4.2.2.2. Análise da Composição Química – Fluorescência de raios-X (FRX)	42
4.2.2.4. Análise Térmica Diferencial	42
4.2.2.5. Análise Granulométrica	42
4.2.2.6. Análise Morfológica	43
4.2.3. Formulações e Preparação das Massas	43
4.2.4. Plasticidade	43
4.2.5. Preparação dos Corpos Cerâmicos	44
4.2.6. Caracterizações das amostras cerâmicas	44
4.2.6.1. Densidade Aparente a Seco	44
4.2.6.2. Densidade Relativa	45
4.2.6.3. Absorção de Água	45
4.2.6.4. Retração Linear de Queima	45
4.2.6.5. Tensão de Ruptura à Flexão	46
4.2.6.7.1. Análise Mineralógica	47
4.2.6.7.2. Análise Microestrutural	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1. Caracterização das Matérias-Primas	48
5.1.1. Análise Mineralógica	48
5.1.2. Análise Química	49

5.1.3. Análise Térmica Dilatométrica.....	50
5.1.3.1. Análise Dilatométrica Ótica	50
5.1.3.2. Análise Dilatométrica Linear	52
5.1.4. Análise Térmica Diferencial.....	53
5.1.5. Análise Granulométrica	55
5.1.6. Análise Morfológica	56
5.1.6.1. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	56
5.1.6.2. Microscopia Ótica	57
5.2. Caracterização das Massas Cerâmicas Incorporadas com RVP	58
5.2.1. Plasticidade	58
5.2.2. Propriedades Físicas e Mecânicas.....	59
5.2.2.1. Densidade Aparente a Seco e Densidade Relativa.....	59
5.2.2.2. Absorção de Água	61
5.2.2.3. Retração Linear de Queima	62
5.2.2.4. Tensão de Ruptura à Flexão	63
5.2.2.5. Módulo de Elasticidade	64
5.2.3. Avaliação Microestrutural	66
5.2.3.1. Análise por Difração de raios-X.....	66
5.2.3.2. Microscopia Ótica	68
5.2.3.3. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	70
6. CONCLUSÕES	78
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Etapas principais do processo de fabricação.....	9
Figura 3.2 – Representação bidimensional da estrutura de (a) sílica cristalina e (b) sílica não cristalina.....	17
Figura 3.3 – Representação esquemática de um vidro sodo- cálcico.....	18
Figura 3.4 – Funções relativas dos óxidos nos vidros.....	19
Figura 3.5– Diagrama demonstrando a relação entre os estados vítreo, líquido e sólido cristalino.....	20
Figura 3.6 – Logaritmo da viscosidade em função da temperatura para vidros.....	21
Figura 3.7 – Processos de produção do vidro plano.....	23
Figura 3.8 – Demanda Global do Mercado de Vidros Planos.....	24
Figura 3.9 – Ciclo de reciclagem do vidro.....	28
Figura 3.10 – (a) Gráfico de porosidade aparente e absorção de água.....	32
Figura 3.11 - Gráfico de tensão de ruptura a flexão.....	33
Figura 3.12 - Propriedades tecnológicas da incorporação de resíduos de vidros em massa cerâmica argilosa.....	34
Figura 3.13 – Micrografias por MEV das cerâmicas com 30% de vidro queimadas nas três temperaturas.....	37
Figura 3.14 – Micrografias por MEV das cerâmicas com 15, 30 e 45% de vidro queimadas 1100°C.....	37
Figura 3.15 – Difractogramas da cerâmica sinterizada a 1100°C (a) sem adição de vidro, (b) 0% em peso de vidro; (c) peso 15% de vidro e (d) 30% em peso de vidro. Q - quartzo, M - mulita, Cr - cristobalita, A - albita, Mu - muscovita e K – caulinita.....	38
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas envolvidas na parte experimental nesse projeto.....	40
Figura 5.1 – Difractograma de raios-X das argilas. C = Caulinita; Gi = Gibsita; Q = Quartzo; M = Mica; Go = Goetita.....	48
Figura 5.2 – Difractograma de raios-x do resíduo de vidro plano.....	49
Figura 5.3 – Resultados da dilatométrica óptica para o resíduo de vidro plano.....	51

Figura 5.4 – Dilatometria linear da Massa argilosa e Massa com 20% RVP.....	53
Figura 5.5 Curva de análise térmica diferencial e termogravimétrica (DTA e TG) da Massa Argilosa.....	54
Figura 5.6 – Curva de análise térmica diferencial e termogravimétrica (DTA e TG) do resíduo de vidro plano.....	55
Figura 5.7 – Distribuição de tamanho de partícula das argilas carolinho e branca e do resíduo de vidro plano.....	56
Figura 5.8 – MEV do resíduo de vidro plano com mapeamento de EDS. Aumento de 400x e 1000x.....	57
Figura 5.9 - MO do resíduo de vidro plano com aumento de (a) 108x e (b) 480x.....	58
Figura 5.10 – Prognóstico de extrusão através dos limites de Atterberg com localização das massas cerâmicas.....	59
Figura 5.11 – Densidade Aparente à Seco das peças secas a 110°C em função do teor de RVP incorporado.....	60
Figura 5.12 – Densidade Relativa das peças secas a 110°C em função do teor de RVP incorporado.....	61
Figura 5.13 – Absorção de água em função do teor de RVP incorporado e da temperatura de queima.....	62
Figura 5.14 – Retração linear em função do teor de RVP incorporado e da temperatura de queima.....	63
Figura 5.15 – Tensão de ruptura à flexão em função do teor de RVP incorporado e da temperatura de queima.....	64
Figura 5.16 – Módulo Elástico Flexural em função do teor de RVP incorporado e da temperatura de queima.....	66
Figura 5.17 – Difratoograma de raios-x das amostras queimadas sem adição de RPV. Q = Quartzo; Fk = Feldspato; H = Hematita; M = Mica; Mu = Mulita.....	67
Figura 5.18 – Difratoograma de raios-x das amostras queimadas com adição de 40% de RPV. Q = Quartzo; Fk = Feldspato; H = Hematita; M = Mica; Mu = Mulita.....	68
Figura 5.19 – Microscopia ótica das peças com 0,10, 20 e 40% de RVP	

queimadas a 850°C.....	69
Figura 5.20 –... Microscopia ótica das peças com 0,10, 20 e 40% de RVP queimadas a 950°C.....	69
Figura 5.21 – Microscopia ótica das peças com 0,10, 20 e 40% de RVP queimadas a 1050°C.....	70
Figura 5.22 – Micrografias obtidas por MEV com 0,10, 20 e 40% de RVP com aumento de 500x, queimadas a 850°C.....	72
Figura 5.23 – Micrografias obtidas por MEV com 0,10, 20 e 40% de RVP com aumento de 500x, queimadas a 950°C.....	72
Figura 5.24 – Micrografias obtidas por MEV com 0,10, 20 e 40% de RVP com aumento de 500x, queimadas a 1050°C.....	73
Figura 5.25 – Micrografias obtidas por MEV da massa argilosa pura com mapeamento EDS e aumento de 500 e 1000x, queimadas a 850°C.....	74
Figura 5.26 – Micrografias obtidas por MEV com 40% de RVP com mapeamento EDS e aumento de 500 e 1000x, queimadas a 850°C.....	75
Figura 5.27 – Micrografias obtidas por MEV da massa argilosa pura com mapeamento EDS e aumento de 500 e 1000x, queimadas a 950°C.....	75
Figura 5.28 – Micrografias obtidas por MEV com 40% de RVP com mapeamento EDS e aumento de 500 e 1000x, queimadas a 950°C.....	76
Figura 5.29 – Micrografias obtidas por MEV da massa argilosa pura com mapeamento EDS e aumento de 500 e 1000x, queimadas a 1050°C.....	77
Figura 5.30 – Micrografias obtidas por MEV com 40% de RVP com mapeamento EDS e aumento de 100 e 500x, queimadas a 1050°C.....	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparativo entre composições de vidros sodo-cálcicos.....	7
Tabela 3.2 – Composição química dos vidros utilizados.....	16
Tabela 3.3 – Composição química do resíduo do vidro sodo-cálcico.....	29
Tabela 3.4 – Composição química do resíduo do vidro sodo-cálcico.....	31
Tabela 3.5 – Composição química do resíduo do vidro sodo-cálcico.....	36
Tabela 4.1 – Composição química do resíduo do vidro plano (% em peso).....	41
Tabela 4.2 – Composição das massas cerâmicas (% em peso).....	43
Tabela 5.1 – Composição química das argilas branca e carolinho e do resíduo de vidro plano [%].....	50

RESUMO

CALDAS, T. C. C. **Reciclagem de Resíduo de Vidro Plano em Cerâmica Vermelha**. 2012. 88f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade de incorporar resíduo de vidro plano em uma massa cerâmica argilosa para obtenção de produtos cerâmicos. O resíduo foi adicionado à argila em percentuais de 0, 5, 10, 20, 30 e 40%. Corpos de prova foram preparados por prensagem uniaxial 20 MPa e posteriormente submetidos ao processo de queima em temperaturas de 850, 950 e 1050°C. As matérias-primas foram submetidas à caracterização química, mineralógica e térmica. Foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas como, retração linear, densidade bulk, absorção de água e resistência mecânica à flexão dos corpos de prova queimados. A microestrutura foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia ótica (MO) e difração de raios-x (DRX). O reaproveitamento do resíduo de vidro plano na indústria cerâmica pode favorecer a redução da temperatura de sinterização, gerando produtos de melhor qualidade. Com base no resultados, verificou-se que o resíduo adicionado em até 20% influenciou positivamente nas propriedades da cerâmica, tornando possível seu reaproveitamento na indústria de cerâmica vermelha.

Palavras-Chave: Cerâmica vermelha, resíduo de vidro plano, incorporação.

ABSTRACT

CALDAS, T. C. C. **Recycling of flat glass waste in Red Ceramic**. 2012. **88f**. Dissertation (master) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

The main purpose of this work was evaluate the viability of incorporate flat glass waste in a kaolinitic clayey body to attainment ceramics products. The residue was added on the clay in percentages of 0, 5, 10, 20, 30 and 40 wt%. Specimens were prepared by uniaxial 20 MPa and afterward submitted to the burning process on temperatures spotted in 850, 950 and 1050 ° C. The raw materials were submitted to chemical, mineralogical and thermal characterization. It were evaluated the physical and mechanical properties as the linear shrinkage, bulk density, water absorption and flexural strength of the burned specimens. The microstructure was evaluated by Microscopy Electronic Scanning (SEM), Optical Microscopy (MO) and X-ray Diffraction (XRD). The reuse of flat glass waste in the ceramics industry might favor a decrease in the sintering temperature, generating better quality products. Based on those results, it was verified that the waste added up to 20 wt% had a positive influence on the ceramic properties, making possible its reuse in the red ceramic industry.

Keywords: red ceramic, flat glass waste, incorporation.

1. INTRODUÇÃO

A reciclagem e o reaproveitamento de resíduos tem se tornado uma preocupação mundial muito relevante nos últimos anos. Visto que, a destinação final adequada dos resíduos sólidos urbanos é um dos maiores problemas da sociedade moderna, novos conceitos e soluções tem sido estudados dentro de uma visão de sustentabilidade e comprometimento com a questão ambiental.

A cerâmica vermelha ou tradicional é atualmente um dos setores da indústria cerâmica que vem utilizando como uma alternativa viável a incorporação de diversos resíduos como forma de minimizar os impactos ao meio ambiente, além do reaproveitamento como matéria-prima em substituição de outros materiais. O resíduo de vidro vem sendo estudado por diversos autores, (Grespam *et. al.*, 2001; Godinho *et. al.*, 2005; Loryuenyong, *et. al.*, 2009), para serem empregados na indústria de cerâmica vermelha.

Os vidros são constituídos por silicatos não-cristalinos que também contém outros óxidos em sua composição, como CaO, Na₂O, K₂O, e Al₂O₃, tais óxidos influenciam em suas propriedades (Callister, 1999).

Apesar de partirem de uma mesma base, existem muitos tipos de vidros com composições diferentes, de acordo com a finalidade a que se destinam. Neste caso, o tipo de vidro estudado será o vidro plano, que pode ser classificado como: vidros planos lisos, vidros cristais, vidros impressos, temperados, laminados, aramados e coloridos fabricados em vidro comum. O vidro plano elaborado em forma de chapas é basicamente usado na construção civil e nas indústrias automobilísticas e moveleiras (Rocha *et. al.*, 2007).

O vidro na forma de pó é um rejeito industrial que não pode ser reaproveitado no próprio processo, pois o pó quando misturado as matérias-primas para a produção do vidro é suspenso ao ar devido à ação de queimadores, que sopram sobre os constituintes da mistura para que ocorra a fusão dos mesmos. O pó de vidro também pode gerar bolhas no material, devido ao grande volume de ar adsorvido nas superfícies das partículas. (Pereira Filho e Toffoli, 2002).

No Brasil a reciclagem de vidros aumentou de forma expressiva. Enquanto em 1991 eram recicladas 15% das embalagens de vidro, em 2008 esse índice atingiu 47% (ABIVIDRO, 2011).

O vidro corresponde a 3% dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil, porém apesar da pequena percentagem, este tem como agravante não ser biodegradável, tornando assim a operação das usinas de triagem e compostagem difíceis.

Diante do exposto tem se desenvolvido pesquisas que visem o aproveitamento desse resíduo em cerâmica vermelha, visto que este é um setor que absorve matérias-primas alternativas para produção de peças cerâmicas.

No caso particular desta pesquisa, propõe-se melhorar a qualidade da cerâmica vermelha produzida na região de Campos dos Goytacazes através da incorporação de resíduos provenientes da indústria civil. O resíduo investigado será o resíduo do vidro plano, pois tem como vantagem a economia de matérias-primas, assim como também a menor geração de lixo urbano.

Um dos pontos importantes da proposta desta pesquisa é avaliar as características fundamentais que um subproduto industrial deve apresentar para ser utilizado como uma matéria-prima alternativa na indústria de cerâmica vermelha.

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

2.1. Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar a influência da adição do resíduo de vidro plano de construção civil nas propriedades tecnológicas e microestruturais de cerâmica vermelha utilizada para fabricação de telhas e tijolos.

Foram traçadas algumas metas, que são expressas pelos objetivos específicos relacionados abaixo:

- ✓ Realizar a caracterização química, morfológica e térmica do resíduo de vidro plano de construção civil;
- ✓ Formular diferentes misturas contendo argila e resíduo de vidro plano de construção civil em diversas proporções;
- ✓ Produzir corpos de prova para avaliar o efeito das incorporações nas propriedades tecnológicas;
- ✓ Caracterização física e mecânica dos corpos cerâmicos através dos ensaios de densidade aparente à seco, absorção de água, retração linear, tensão de ruptura e módulo elástico;
- ✓ Análise microestrutural das peças cerâmicas.

2.2. Justificativas

- ✓ Diminuir a destinação dos resíduos de vidro plano para aterros, preservando assim o meio ambiente;
- ✓ Possível melhora nas propriedades tecnológicas, gerando produtos de melhor qualidade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contempla a revisão bibliográfica que tem por objetivo apresentar fundamentos básicos relacionados a materiais cerâmicos, cerâmica vermelha, vidros e resíduos.

3.1. Indústria Cerâmica

3.1.1. Materiais Cerâmicos

O termo “cerâmica” vem da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria-prima queimada”, indicando que as propriedades desejáveis destes materiais são normalmente atingidas através de um processo de tratamento térmico a altas temperaturas conhecido como sinterização. (Callister, 2007).

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica, os materiais cerâmicos compreendem os materiais inorgânicos, não-metálicos que ficam utilizáveis geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas.

De acordo com Santos (1989), cerâmica é o ramo da indústria no qual “minerais de composição inconstante e pureza incerta são submetidos a temperaturas mal definidas, durante períodos de tempo que fazem reações desconhecidas ocorrerem de forma incompleta, originando produtos heterogêneos e não-estequiométricos, denominados materiais cerâmicos”.

O setor cerâmico é dividido em sub-setores em função de fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização, assim é adotada a seguinte classificação, de acordo com ABC, (2011):

- ✓ Cerâmica Vermelha: Compreende alguns materiais empregados na construção civil como telhas, tijolos, blocos, lajes, etc.
- ✓ Materiais de Revestimento/Placas Cerâmicas: São materiais utilizados como revestimentos de paredes, pisos entre outros. Podendo ser chamados de azulejo, pastilha, porcelanato, grés, lajota, etc.
- ✓ Cerâmica Branca: São materiais constituídos por um corpo branco e geralmente revestidos por uma camada vítrea transparente e incolor. Neste ramo podemos citar louças sanitárias e de mesa, isoladores elétricos de alta e baixa tensão e cerâmica artística.

- ✓ **Materiais Refratários:** Compreende diversos produtos que tem por finalidade suportar temperaturas elevadas. Geralmente também são materiais que suportam esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações. São classificados quanto à matéria-prima ou componentes químico: sílica, sílico-aluminoso, aluminoso, mulita, magnesianocromítico, cromítico-magnésiano, carbetto de silício, grafita, carbono, zircônia, zirconita, espinélio e outros.
- ✓ **Isolantes Térmicos:** São materiais caracterizados por sua alta resistência térmica como refratários isolantes, isolantes não refratários (vermiculita expandida, sílica diatomácea, diatomito, silicato de cálcio, lã de vidro e lã de rocha), fibras ou lãs cerâmicas.
- ✓ **Fritas e Corantes:** São matérias-primas utilizadas no setor de acabamentos, as fritas com finalidade de aprimorar a estética, tornar a peça impermeável, aumentar a resistência mecânica e melhorar ou proporcionar outras características e os corantes para conferir colorações diversas e efeitos especiais nos corpos cerâmicos.
- ✓ **Abrasivos:** São materiais naturais ou sintéticos empregados para desgastar, polir ou limpar outros materiais. Entre os produtos conhecidos podemos citar o diamante, carbetto de silício e alumina.
- ✓ **Vidro, Cimento e Cal:** São três importantes segmentos cerâmicos e que, por suas particularidades, são muitas vezes considerados à parte da cerâmica.
- ✓ **Cerâmica de Alta Tecnologia/Cerâmica Avançada:** São os materiais utilizados nas áreas aeroespacial, eletrônica, nuclear e muitas outras. Neste setor os materiais utilizados são desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados. Como alguns exemplos, podemos citar: naves espaciais, satélites, usinas nucleares, materiais para implantes em seres humanos, aparelhos de som e de vídeo, suporte de catalisadores para automóveis, sensores (umidade, gases e outros), ferramentas de corte, brinquedos, acendedor de fogão, etc.

3.1.2. Propriedades dos materiais cerâmicos

As propriedades dos materiais cerâmicos permitem que estes sejam aplicados em larga escala a uma gama de indústrias como, civil, eletrônica, comunicação,

computadores, aeroespacial, entre outras que dependem do uso desse material. Isto ocorre devido a propriedades tais como a facilidade de conformação, baixo custo e densidade, resistência à corrosão e a temperaturas elevadas, que fizeram com que os materiais cerâmicos tradicionais conquistassem posições de relevo em diferentes setores industriais e artísticos.

Para o caso de cerâmica vermelha, enfatizando tijolos e telhas, as principais propriedades avaliadas de acordo com as normas vigentes no Brasil são: absorção de água, densidade aparente, retração linear, resistência mecânica, entre outras.

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

3.1.3. Matérias-primas

3.1.3.1. Argilas

As argilas são as principais matérias-primas utilizadas para produção de produtos cerâmicos. Segundo Gomes (1985), a argila não é um mineral, mas sim um agregado de minerais e substâncias coloidais, formada por grande quantidade de material amorfo.

De acordo com Grim (1953), a argila é um material terroso de granulometria fina que quando em contato com a água apresenta certa plasticidade. As argilas são constituídas essencialmente por pequenas partículas cristalinas conhecidas por argilominerais (silicatos hidratados de alumínio e ferro). Além dos argilominerais é possível encontrar nas argilas impurezas de grãos de quartzo, mica, feldspato e outros minerais, sais solúveis e matéria orgânica. Os argilominerais são compostos quimicamente por silicatos hidratados de alumínio e ferro, podendo ainda conter teor de elementos alcalinos e alcalinos terrosos.

As propriedades dos argilominerais variam de acordo com sua composição e estrutura, devido a isto são divididos por grupos como, caulinita, esmectita, clorita, illita e paligorsquita.

Segundo Santos (1989), uma argila ideal deve apresentar as seguintes características:

- ✓ Não conter ou apresentar baixo teor de carbonato, sulfatos ou sulfitos;
- ✓ Ser de fácil desagregação;
- ✓ Permitir moldagem adequada;
- ✓ Ter certo teor de matéria orgânica;
- ✓ Após a queima apresentar a cor avermelhada;
- ✓ Apresentar granulometria fina e ideal distribuição granulométrica dos materiais argilosos e inertes, com objetivo de garantir o controle das dimensões finais do produto.

3.1.3.2. Composição Química das Argilas

A composição química de uma argila varia de acordo com a jazida (local onde é retirada), da formação geológica do terreno, da era de formação e da influência hidrotermal exercida sobre o material (Bitencourt, 2004).

A importância de se conhecer a composição química de uma argila é devido ao seu comportamento tecnológico, visto que esta depende dos minerais constituintes.

A caulinita é o mineral básico das argilas, conhecido por sua estrutura lamelar natural do tipo 1:1. É um aluminossilicato hidratado cujo de um lado da lamela é constituído por uma estrutura do tipo gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e do outro por estruturas de sílica (SiO_2) e água (Gardolinski, 2001).

A análise química de uma argila mostra que são constituídas de silício, alumínio e água, e, frequentemente por quantidades apreciáveis de ferro e de materiais alcalinos e alcalinos terrosos.

Na Tabela 3.1 pode-se observar os resultados da análise química de duas argilas brasileiras (A e B), Campos dos Goytacazes - RJ e Vale do Itajaí – SC, respectivamente.

Tabela 3.1 – Composição química em percentagem de duas argilas brasileiras.

Argila	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
A	44.70	29.03	9.15	1.34	0.28	1.09	1.55	0.4
B	72.4	11.82	3.75	0,84	0.34	0.52	0.23	0.1

O baixo teor de sílica e elevado teor de alumina na argila A é um indicativo de elevado percentual de argilominerais e baixo teor de quartzo livre, enquanto a argila B apresenta a razão sílica/alumina igual 6,1. O alto teor na razão sílica/alumina significa baixo teor de minerais argilosos.

Para ambas as argilas os óxidos de cálcio e magnésio (CaO e MgO) são baixos, isto significa a ausência carbonatos.

A argila B apresenta teores maiores de sílica, porém um menor teor de óxidos fundentes (K_2O e Na_2O) em relação à argila A, em que os óxidos fundentes ultrapassam 1 %. Estes óxidos baixam o ponto de fusão reforçando a idéia de que quando em baixo teor necessitam de uma alta temperatura de sinterização.

3.1.3.3. Propriedades das Argilas

As argilas são os principais constituintes para a fabricação de peças cerâmicas, assim faz-se necessário o conhecimento de suas principais propriedades para obtenção de uma massa cerâmica adequada para o processo de produção. Dentre as quais destacam-se:

- ✓ Plasticidade: propriedade adquirida por argilas quando misturadas a água, podendo ser moldada sem ruptura e sem variação de volume.
- ✓ Granulometria: característica importante das argilas por influenciar em suas propriedades. Os minerais que constituem as argilas apresentam tamanho de partícula inferior a 2 μm (diâmetro esférico equivalente).
- ✓ Retração: a retração nas peças cerâmicas pode ocorrer em duas etapas, na etapa de secagem e queima. Durante a secagem a retração aumenta em virtude da aproximação das partículas sólidas devido à eliminação das águas higroscópica e de constituição. Durante a queima a retração depende dos minerais presentes na argila, por exemplo, uma argila rica em fundentes acarretará na retração da peça durante a queima, devido ao início da fusão e preenchimento dos vazios.

3.1.4. Cerâmica vermelha

A cerâmica vermelha, também conhecida por cerâmica estrutural é um dos segmentos do setor da indústria cerâmica que se subdivide de acordo com matérias-

primas, propriedades e área de atuação. Existe também uma subdivisão dentro do campo de cerâmica vermelha que compreende os seguintes materiais: tijolos, telhas, blocos de vedação e estruturais, manilhas, pisos rústicos, cerâmica utilitária e também agregados leves de argila expandida (ABC, 2011).

É um setor que permite com grande facilidade a incorporação de materiais alternativos, visto que uma das propriedades das argilas que favorecem a inertização dos resíduos é a capacidade de troca de cátions. Daí vem à importância do estudo de resíduos gerados pelas indústrias civil, metalúrgica, siderúrgica, têxtil, mineração, papel e celulose, entre outras.

3.1.5. Processo de fabricação de cerâmica estrutural

Na área de cerâmica estrutural o processo para produção de peças, com ênfase em telhas e tijolos, é composto basicamente por 4 etapas: preparação da massa, conformação das peças, secagem e queima, que podem ser visualizadas na Figura 3.1.

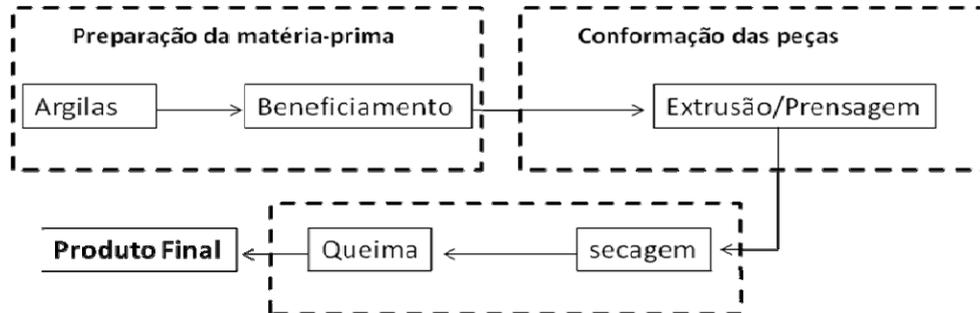


Figura 3.1 – Etapas principais do processo de fabricação.

Segundo ABC (2011), a fabricação de produtos como telhas e tijolos está diretamente ligada ao setor da mineração de argilas, cujo geralmente a própria cerâmica realiza a extração da argila.

3.1.5.1. Preparação da massa

O preparo da massa cerâmica consiste da formulação e mistura das matérias-primas, sendo a formulação de forma empírica, busca-se uma condição de massa

próxima a ideal, que atenda características determinadas para uma boa moldagem, secagem e queima, proporcionando assim um produto final de melhor qualidade.

A composição ideal requer plasticidade e fusibilidade, para propiciar boa trabalhabilidade e resistência mecânica de queima.

3.1.5.2. Conformação da peça

Na fabricação de cerâmica vermelha, os principais processos utilizados são a extrusão e prensagem.

A extrusão é o processo mais utilizado na indústria de cerâmica estrutural por ser mais econômico, porém gera produtos de menor valor. É realizado por uma máquina chamada extrusora, onde uma massa na forma de uma pasta plástica e rígida é forçada através de um molde, que em seguida é cortada em tamanhos pré-determinados.

Para se obter uma massa adequada para o processo de extrusão é necessário que esta seja dosada utilizando matérias-primas não-plásticas e plásticas, o que ocasiona um ajuste de plasticidade da mistura às condições adequadas de processamento (Meira, 2001).

A prensagem é um método aplicado a alguns tipos de telhas, com maior valor agregado por ser um método mais caro, onde a extrusão é uma etapa intermediária do processo de conformação, seguindo-se após o corte da coluna extrudada, a prensagem. O método consiste em colocar a massa granulada e com menor teor de umidade num molde de borracha ou outro material polimérico, fechando hermeticamente, introduz-se numa câmara contendo um fluído, que é comprimido e em conseqüência exerce uma forte pressão, por igual, no molde (SENAI, 2010).

3.1.5.3. Secagem

É a etapa do processo logo após a conformação. É uma operação importante, onde a água utilizada na conformação é eliminada de maneira lenta e uniforme, a fim de evitar possíveis defeitos na peça como trincas, empenamentos ou quebra (Norton, 1973).

A secagem pode ser feita em galpões ou estufa, sendo o galpão o mais utilizado pelas olarias. As perdas giram em torno de 5 % durante o processo de

secagem. Após a secagem, o produto deve ter resistência suficiente para possibilitar a sua manipulação até o processo de queima (Soares *et al.*, 2004).

3.1.5.4. Queima

A queima é a etapa mais importante de todo processo produtivo, pois é durante essa etapa que os produtos adquirem suas propriedades finais, através das transformações físicas, químicas e mecânicas causadas pela ação do fogo.

Ha quatros fases presentes no processo de queima:

- ✓ Esquente ou pré-aquecimento: aquecimento gradual para retirada da água residual, num período de 8 a 13 horas chegando até 650°C;
- ✓ Fogo forte ou caldeamento: inicia por volta de 650° e pode ser elevada em maior ritmo até 950°C ou 1000°C. É nessa fase que se verificam as reações químicas que proporcionam ao corpo cerâmico as características de dureza, estabilidade, resistência aos vários agentes físicos e químicos, como também a coloração pretendida;
- ✓ Patamar, a temperatura máxima de queima é mantida por um determinado período de tempo, dessa forma, a câmara aproxima ao máximo o gradiente de temperatura por todo o forno;
- ✓ Resfriamento, realizado de forma gradual e cuidadosa para evitar ocorrência de trincas, através da chaminé ou do aproveitamento de calor para os secadores, num período em torno de 38 a 50 horas (SENAI, 2010).

3.1.6. Resíduos da Indústria Cerâmica

A indústria cerâmica é uma das que mais se destacam na reciclagem de resíduos industriais e urbanos, em virtude de possuir elevado volume de produção que possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos e que, aliado às características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e às particularidades do processamento cerâmico, faz da indústria cerâmica como uma das grandes opções para a reciclagem de resíduos sólidos.

De acordo com Vieira (2009), os resíduos da indústria cerâmica foram classificados da seguinte forma:

✓ Resíduos combustíveis: apresenta carbonáceo, matéria combustível que contém carbono, que contribui energeticamente para o processo de sinterização da cerâmica. Nesta categoria podemos citar: resíduos oleosos (derivados do petróleo), resíduos de lama de alto forno e resíduos da indústria do papel (Vieira, 2009).

✓ Resíduos fundentes: apresentam teor de compostos como, alcalinos e alcalinos terrosos que auxiliam no processo de sinterização, reduzindo a temperatura de sinterização, através do aparecimento de uma fase líquida. Neste caso temos como exemplos, resíduos de lamas de rochas ornamentais, resíduos de vidros, cinzas fundentes e resíduos contendo Boro (Vieira, 2009).

✓ Resíduos que afetam as propriedades: apresentam substâncias que modificam o comportamento da cerâmica, e não podem ser incluídos nas duas primeiras categorias. Considerando tais propriedades podemos citar: chamote, lodo de estação de tratamento de água, lama e escória do refino do aço, cinzas não-fundentes (bagaço da cana-de-açúcar), resíduos do processo de mineração (resíduos de ferro, cobre, manganês, etc.), lama do processo galvanico, lama de indústria têxtil, lodo de curtume, sobras de construção e demolição, rejeito de areia do processo metalúrgico de redução de minérios (Vieira, 2009).

3.1.6.1. Uso de Resíduos em Cerâmica Vermelha

Atualmente a área dos materiais cerâmicos tem sido amplamente estudada a fim de obtenção de novos materiais a partir de matérias-primas alternativas. Apresentam-se a seguir alguns estudos referentes à incorporação de resíduos em diversos processos de fabricação de cerâmica vermelha.

Santos (2007), analisou as propriedades físicas e mecânicas de uma argila proveniente da região do Recôncavo Baiano, com adições de 5, 10 e 15% em peso de rejeitos cerâmicos. Seus resultados mostraram que os corpos de prova com incorporações de 15% em peso de rejeitos cerâmicos, apresentaram propriedades superiores as da argila, nas temperaturas entre 900° e 1000°C, ou seja, é possível gerar produtos de qualidade utilizando a combinação de resíduo cerâmico com a argila do Recôncavo Baiano.

Faria et. al. (2010), estudou a influência da adição do resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades tecnológicas da cerâmica vermelha. Utilizando assim, o resíduo de cinza como matéria-prima alternativa para

substituição parcial da argila. Foram estudadas cinco formulações com 0, 5, 10, 15 e 20 % em peso de resíduo misturado com argila caulínica. A temperatura estudada foi de 1000°C e as propriedades analisadas foram retração linear, absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente e resistência à compressão. Os resultados deste trabalho mostraram que o resíduo pode ser utilizado como matéria-prima alternativa, pois influencia positivamente na resistência mecânica em incorporações de até 10%.

Silva (2007), afirma ser possível a adição de resíduos da construção civil como, areia, concreto, tijolos vermelhos, cimento e blocos de cimento e argamassa na massa para produção de cerâmica vermelha. As amostras foram submetidas a ensaios de absorção de água, retração linear, porosidade aparente, massa específica, resistência à flexão, DRX e MEV. Os resultados mostraram-se satisfatórios, visto que é possível a adição em até 50% de resíduos nas massas cerâmicas sem grandes perdas na resistência mecânica, porém ficou provado que os melhores resultados para a fabricação de peças cerâmicas é de até 30% de resíduos.

Morais (2010), avaliou o efeito da incorporação de resíduo de lâmpada fluorescente em cerâmica vermelha para fabricação de telhas e tijolos. Ficou provado que o resíduo atua como regulador da plasticidade/trabalhabilidade da massa cerâmica, além de promover a diminuição da porosidade das peças. Os resultados provaram que as peças com incorporações com 10% do resíduo, queimadas a 1050°C, apresentaram aumento na resistência mecânica e diminuição da absorção de água.

3.2. Vidro

3.2.1. Breve Histórico

Em torno do ano de 5000 a. C. data-se os primeiros registros sobre um novo material descoberto por mercadores fenícios, o vidro. Acredita-se que foi na tentativa de criação de uma fogueira, onde a mistura de areia com blocos de nitrato de sódio, os fenícios observaram o líquido transparente, que mais tarde seria o vidro.

No ano 100 a. C. os romanos contribuíram para o desenvolvimento das indústrias do vidro. Produziam vidro por técnicas de sopro dentro de moldes

aumentando em muito, a possibilidade de fabricação em série das manufaturas, os romanos foram os primeiros a usar o vidro para janelas (USP, 2011).

Foi no Egito, na Mesopotâmia, Síria ou Grécia que vidro passou a ser produzido com os elementos básicos de sua composição como cálcio, cal, potássio e a barrilha, porém eram vidros opacos e arenosos.

Posteriormente, também no Egito foi descoberta a técnica de fole aplicada ao forno, onde se conseguiu aumentar o calor e assim tornar a massa vítrea mais maleável. Vindo mais tarde a ser descoberta a técnica do sopro (fabricação de vidro oco - garrafas, potes, copos, bulbos, etc.) na Síria e em Alexandria, quando Roma já estendia seu domínio sobre o Oriente Médio.

A história da indústria do vidro no Brasil iniciou-se com as invasões holandesas, em torno de 1624, em Olinda e Recife (PE), onde a primeira oficina de vidro foi montada por quatro artesões que acompanharam o príncipe Maurício de Nassau. A oficina fabricava vidros para janelas, copos e frascos.

Em 1812 entra em operação uma fábrica instalada na Bahia que produzia vidros lisos, de cristal branco, frascos, garrações e garrafas.

Foi a partir do início do século XX que a indústria do vidro se desenvolveu com a introdução de fornos contínuos a recuperação de calor e equipados com máquinas semi ou totalmente automática para produções em massa.

Juntas, a inglesa Pilkington e a francesa Saint-Gobain criaram, em 1982 no Estado de São Paulo, a Cebrace. Tornando assim a Cebrace a primeira fábrica de vidro float do Brasil, possuindo hoje três unidades (duas em Jacareí e uma e Caçapava), onde juntas produzem até cerca de 1.800 toneladas de vidro por dia (Cebrace, 2011).

Mais recentemente, em 1998, a multinacional americana Guardian se instalou em Porto Real, Rio de Janeiro. Basicamente, hoje o Brasil tem quatro indústrias de fornecimento vidreiro nacional: Cebrace, Guardian, UBV e Saint-Gobain (ABRAVIDRO, 2011).

O vidro tornou-se uma peça fundamental para projetos de arquitetura e decoração, devido ao aperfeiçoamento tecnológico deste material, apresentando hoje um papel importante na vida do homem moderno. Estando presente em janelas, pára-brisas de automóveis, telas de computadores e televisões e incontáveis outras aplicações.

3.2.2. Definição e Tipos de Vidros

Os vidros pertencem ao grupo dos materiais cerâmicos amorfos e podem ser divididos em vários tipos. As duas principais características desses materiais são a sua transparência ótica e a relativa facilidade com a qual podem ser fabricados (Callister, 2007).

Uma definição aceita internacionalmente, segundo o autor Navarro, “ASTM (1037) Standards for Glass”. O vidro é um produto inorgânico de fusão que tem sido esfriado numa condição rígida sem cristalização (Navarro, 1991).

Shelby (1997) define um vidro como um sólido amorfo com ausência completa de ordem a longo alcance e periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea. Qualquer material inorgânico, orgânico ou metálico, formado por qualquer técnica, que exhibe um fenômeno de transição vítrea é um vidro.

Atualmente a definição mais completa é a proposta pelo comitê do U.S.A National Research Council: “O vidro é, por difração de raios X, um material amorfo que exhibe uma temperatura de transição vítrea. Esta é definida como o fenômeno pelo qual uma fase amorfa sólida exhibe, devido à mudança de temperatura, uma variação repentina na derivada das propriedades termodinâmicas, tais como calor específico e coeficiente de expansão, em relação as suas respectivas fases cristalina e líquida”.

Segundo Akerman (2000), existem infinitas formulações de vidros, visto que depende da aplicação, processo de produção e da disponibilidade de matérias-primas. As principais classes dos vidros são divididas em:

- ✓ Sílica Vítrea

Esses vidros são os mais caros e mais difíceis de produzir, apresentando em sua composição areia de sílica ou cristais de quartzo e o mais alto ponto de fusão, 1725 °C. A principal característica dessa classe é o baixo coeficiente de expansão térmica devido à formação da sílica vítrea, sendo vidros ideais para aplicações de alta tecnologia, como janelas de veículos espaciais, espelhos astronômicos, e outras aplicações aonde são exigidos resistência a choques térmicos ou estabilidade dimensional (Akerman, 2000).

✓ Vidros Sodo-Cálcicos

São os vidros mais antigos, porém mais utilizados, cujo podemos notar em nosso dia-a-dia como, garrafas, frascos, potes, janelas, bulbos e tubos de lâmpadas. A composição dos vidros sodo-cálcicos está dentro de uma faixa estreita de composição. Eles contêm, normalmente, entre 8 e 12% em peso de óxido de cálcio e de 12 a 17 % de óxido de sódio, podendo-se compensar o sódio com potássio e o cálcio com magnésio (Akerman, 2000). A Tabela 3.2 apresenta um comparativo entre composições de vidros sodo-cálcicos.

Tabela 3.2 – Comparativo entre composições de vidros sodo-cálcicos.

Componentes	Akerman (2000)		Callister (1999)	Handbook (2003)	Cebrace (2011)
	Plano	Lâmpada			
SiO ₂	71	73	74	72,8	72
Al ₂ O ₃	1	1	1	1,4	0,7
Na ₂ O	13,5	16,5	16	12,8	14
CaO	10	5	5	8,1	9
MgO	4	4	4	3,8	4
K ₂ O	0,5	0,5	-	0,7	0,3
Outros	-	-	-	-	-

✓ Vidros ao chumbo

Esta classe apresenta uma longa faixa de trabalho, podendo ser trabalhada a baixas temperaturas. É utilizado na fabricação de vidros nobres como, copos e taças finas (cristal), pois o chumbo confere ao vidro um maior índice de refração, incrementando seu brilho. Também podem ser aplicados na indústria eletro-eletrônica e ótica, devido a propriedades como resistividade e refração, respectivamente (Akerman, 2000).

✓ Vidros borossilicatos

São vidros que apresentam alta resistência ao choque térmico e ataque químico, por isso são utilizados para fabricação de materiais domésticos que podem

ser levados ao fogo como o Pyrex e do Marinex e materiais de laboratório (Akerman, 2000).

✓ Vidros alumino-borossilicato

São vidros que contém óxido de alumínio em sua composição. É similar ao boro-silicato, mas tem maior resistência a produtos químicos, suporta alta temperatura e é mais difícil de ser produzido. Quando misturado com um condutor elétrico, é usado em circuitos elétricos como resistência. Também são utilizados em tubos de combustão, fibras de reforço, vidros com alta resistência química e vitro-cerâmicos (Akerman, 2000).

3.2.3. Estrutura do Vidro

Os vidros são substâncias termodinamicamente instáveis, estruturalmente desordenadas, quimicamente complexas; apresentam-se de formas variadas e tecnologicamente com propriedades e aplicação muito diversas (Navarro, 1985).

A Figura 3.2 compara a estrutura básica de um sólido não-cristalino ou vidro, constituído por sílica, tal estrutura também é conhecida por sílica fundida ou sílica vítrea, com a estrutura da sílica cristalina.

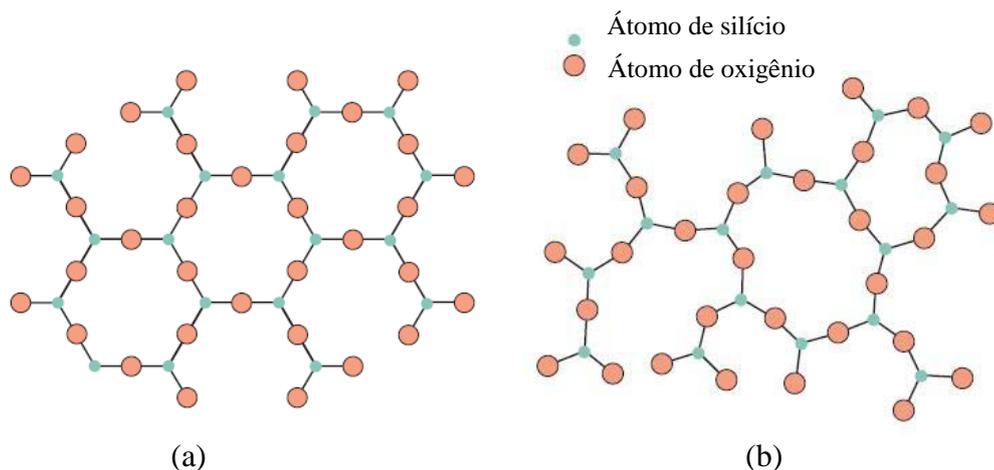


Figura 3.2 – Representação bidimensional da estrutura de (a) sílica cristalina e (b) sílica não cristalina (Callister, 2007).

A estrutura da sílica não cristalina apresenta-se de forma desordenada e não repetitiva e varia de acordo com a história térmica do vidro, ou seja, depende da taxa

de resfriamento vidro quando passou de líquido para sólido (Delbianco Filho, 2003). O vidro apresenta como unidade básica a estrutura tetraédrica SiO_4^{4-} , podendo também formar outras estruturas vítreas através dos óxidos formadores de rede (B_2O_3 e GeO_2), óxidos modificadores de rede (CaO e Na_2O) e óxidos intermediários (TiO_2 e Al_2O_3) (Callister, 2007).

Vidros a base de sílica com outros óxidos adicionados, como os óxidos modificadores de rede CaO e Na_2O são utilizados para fabricação de recipientes, janelas, entre outros produtos. A Figura 3.3 mostra a representação esquemática de um vidro sodo-cálcico.

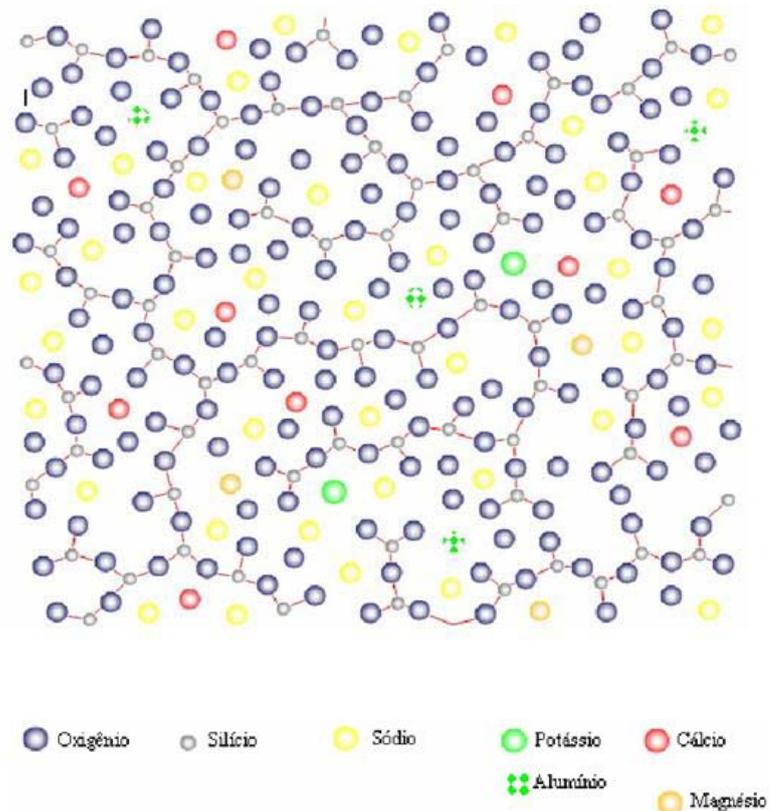


Figura 3.3 – Representação esquemática de um vidro sodo-cálcico (Navarro, 1991).

3.2.4. Propriedades dos Vidros

As propriedades dos vidros dependem de suas características estruturais, assim podemos notar na Figura 3.4 um esquema que mostra de forma quantitativa como as propriedades dos vidros variam em relação a um aumento de óxidos constituintes.

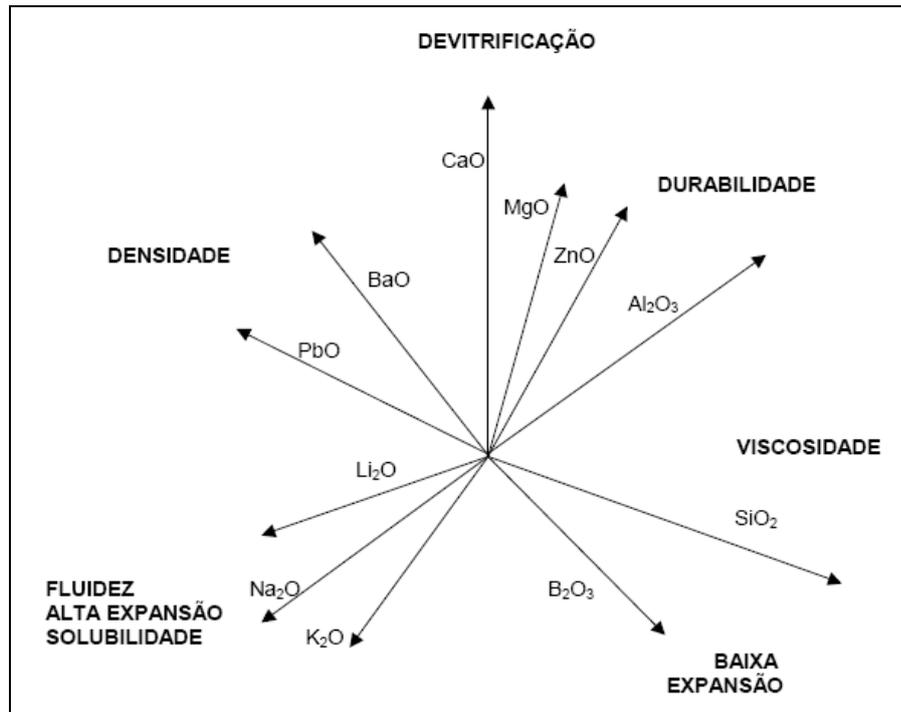


Figura 3.4 – Funções relativas dos óxidos nos vidros (Navarro, 1991).

Segundo Navarro (1991), a soma dos óxidos presentes na composição dos vidros deve fechar em 100%, pois o aumento e diminuição dos óxidos influenciam diretamente nas propriedades desejadas.

Os materiais vítreos ou não-cristalinos apresentam algumas propriedades que dependem de alterações na temperatura. Essa temperatura é conhecida por temperatura de transição vítrea (T_g), onde abaixo dessa temperatura encontramos o vidro, e acima dessa temperatura, o material é um líquido super-resfriado, e finalmente um líquido (Callister, 2007).

De acordo com Alves *et al.*, (2001), a temperatura de transição vítrea, T_g , é uma temperatura característica para os vidros, definindo a passagem do estado vítreo para o estado viscoelástico, através da chamada relaxação estrutural. Os conceitos de estado vítreo e viscoelástico são emprestados da Reologia (estudo das propriedades associadas à fluidez).

Segundo Callister (2007), a diferença entre um sólido cristalino e não-cristalino esta na dependência do volume específico em função da temperatura. Assim a Figura 3.5 ilustra o contraste do volume específico versus temperatura sobre o comportamento de materiais cristalinos e não-cristalinos, onde os materiais

cristalinos se solidificam na temperatura de fusão (T_f) e a temperatura de transição vítrea (T_g) é característica dos materiais não- cristalinos.

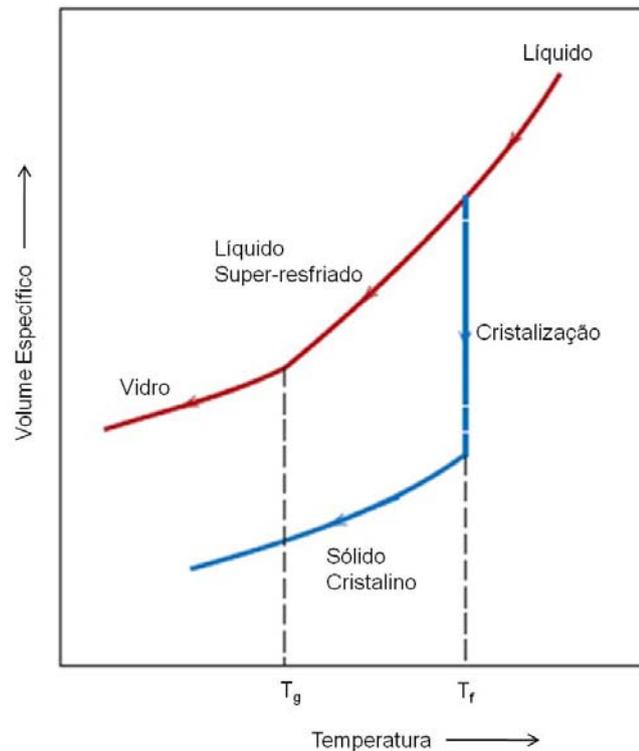


Figura 3.5 – Diagrama demonstrando a relação entre os estados vítreo, líquido e sólido cristalino (Callister, 2007).

Se a taxa de resfriamento é lenta, a cristalização será favorecida no ponto T_f , temperatura única de fusão que é característica dos materiais cristalinos. Portanto se a taxa de resfriamento é alta, o volume do líquido super-resfriado que se forma decresce, causando um aumento contínuo da viscosidade até a temperatura T_g , onde o líquido super-resfriado passa ao estado vítreo.

A composição química e temperatura influenciam diretamente na viscosidade do vidro, por isso a importância de estudar as características viscosidade-temperatura que sob ponto de vista tecnológico é importante para as operações de fabricação de um vidro.

A Figura 3.6 mostra as curvas do logaritmo da viscosidade em função da temperatura para vidros de sílica fundida, vidros de alto teor de sílica, vidro borossilicato e vidros sodo-cálcicos, mostrando pontos específicos para o processamento de um vidro.

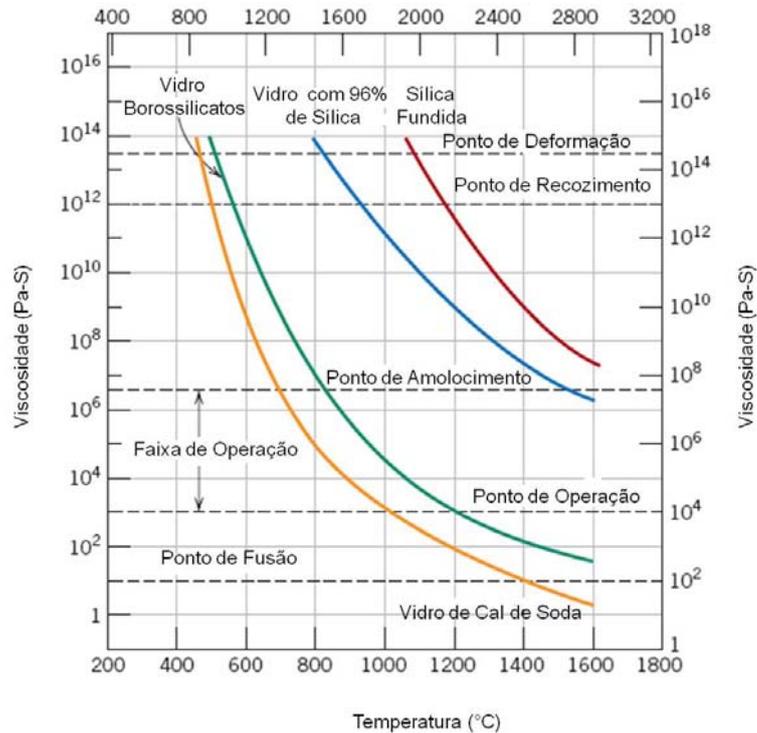


Figura 3.6 – Logaritmo da viscosidade em função da temperatura para vidros (Callister, 2007).

Para vidros sodo-cálcicos, podemos notar na Figura 3.6 que a faixa de trabalho onde ocorre à maioria das operações de conformação dos vidros, se encontra entre as temperaturas de amolecimento e de operação, sendo o ponto de amolecimento para este tipo de vidro a 700°C.

3.2.5. Vidros Planos

Vidros planos, também conhecidos por folhas de vidros são elaborados na forma de chapas, e são usados basicamente na construção civil e nas indústrias automobilística e moveleira.

A maior parte dos vidros planos é classificada por vidros sodo-cálcicos, cuja composição geral é composta por:

- ✓ Um vitrificante, a sílica, introduzida sob a forma de areia (70 a 72%);
- ✓ Um fundente, a soda, sob a forma de carbonato e sulfato (cerca de 14%);
- ✓ Um estabilizante, o óxido de cálcio, sob a forma de calcário (cerca de 10%);
- ✓ Outros óxidos, como alumínio e magnésio, que melhoram a resistência à ação dos agentes atmosféricos.

Segundo CEBRACE (2011), o processo de fabricação do vidro plano pode ser dividido em 3 etapas:

- ✓ A preparação da composição;
- ✓ A fusão da composição produzindo a massa de vidro fundido;
- ✓ A conformação dessa massa nos diversos produtos que existem.

3.2.5.1. Preparação da Composição

Os silos de armazenamento das matérias-primas (sob forma granuladas) são responsáveis por alimentar as balanças, cuja finalidade é dosar a quantidade de cada material. Após a pesagem as matérias-primas são conduzidas a um misturador para homogeneização da mistura vitrificável.

3.2.5.2. Fusão da Composição

Segundo Callister (2007), o ponto de fusão corresponde à temperatura onde o vidro é fluido suficiente para ser considerado líquido.

Nesta etapa a mistura vitrificável é levada ao forno de fusão, onde será fundida e transformada em vidro fundido.

3.2.5.3. Conformação

Etapa cuja massa fundida e viscosa é transformada em um produto final. A fase de conformação deve ocorrer no mesmo local onde se encontra o forno, sendo o vidro fundido conduzido até as máquinas através de canais chamados de feeder ou simplesmente canal. A fase de conformação do vidro é diferente, conforme o tipo de produto a ser fabricado.

3.2.6. Fabricação dos Vidros Planos

A principal tecnologia para a produção do vidro plano é conhecida como processo float, sendo o vidro obtido denominado por “vidro float” ou “vidro flotado”. O termo “float” vem do inglês e significa flutuar, boiar.

Esse processo produz vidros planos com elevado grau de planicidade, cujo consiste em fazer uma chapa de vidro laminado.

O vidro float (ou comum) é composto por sílica (areia), potássio, alumina, sódio (barrilha), magnésio e cálcio. Essas matérias-primas são misturadas com precisão e fundidas no forno. O vidro, fundido a aproximadamente 1000 °C é continuamente derramado num tanque de estanho liquefeito, quimicamente controlado, em seguida ele flutua no estanho, espalhando-se uniformemente. A espessura é controlada pela velocidade da chapa de vidro que se solidifica à medida que continua avançando. Após o recozimento (resfriamento controlado), o processo termina com o vidro apresentando superfícies polidas e paralelas, e então as chapas de vidro são cortadas e acondicionadas para o transporte. O vidro float é a matéria-prima para o processamento de todos os demais vidros planos, tendo como exemplos os vidros temperados, o laminado e o refletivo ou espelhado (ABRAVIDRO, 2011).

A Figura 3.7 é uma representação esquemática do processo de produção do vidro plano pelas técnicas de laminação e float glass.

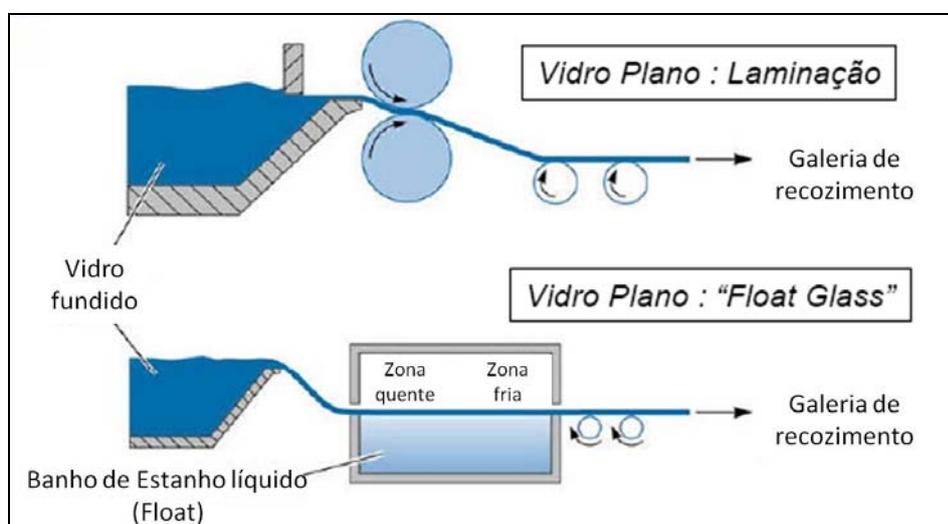


Figura 3.7 – Processos de produção do vidro plano (Adaptado Caldas, 2011).

3.2.7. Perfil do Segmento de Vidros Planos

A cada ano a procura por vidros planos vem crescendo 4 por cento, este crescimento é impulsionado pelas indústrias de construção civil e automotiva. O mercado global de vidro plano em 2009 foi de aproximadamente 50 milhões de

toneladas. Este é dominado por Europa, China e América do Norte, que juntas representam mais de 70 por cento da demanda. A importância da China como um mercado para o vidro tem vindo a aumentar rapidamente desde o início de 1990 como o país tornou-se mais aberto ao investimento estrangeiro, a economia se expandiu PILKINGTON (2010). Na Figura 3.8 nota-se que a China correspondeu por cerca de 50 por cento da demanda mundial de vidros planos.

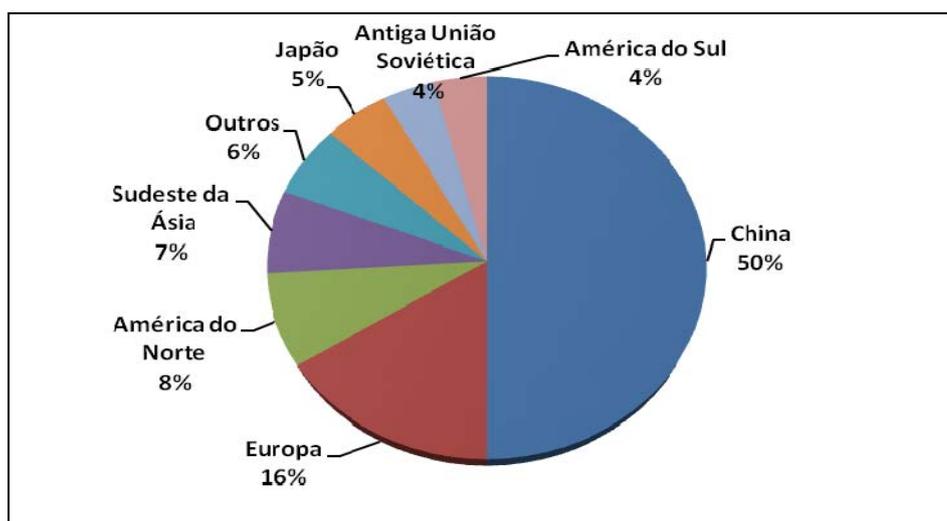


Figura 3.8 – Demanda Global do Mercado de Vidros Planos (PILKINGTON, 2010).

O mercado consumidor de vidros planos no Brasil pode ser assim esquematizado:

- ✓ 60 % na construção civil;
- ✓ 39 % na indústria automotiva;
- ✓ 1 % na indústria do mobiliário (doméstico).

Sendo que metade da produção do mobiliário é consumida pela indústria de bebidas; 38,5 % pela indústria farmacêutica; 5 % pela indústria cosmética e 6,5 % por outros setores (PROJESUL, 2011).

3.3. Resíduos Sólidos

Os resíduos são resultados de diversas atividades da comunidade e tem origem: industrial, doméstica, hospitalar, agrícola, de serviços e varrição pública. São classificados quanto as suas características físicas (seco e molhado), quanto a

sua composição química (orgânico e inorgânico), quanto ao estado físico (sólido líquido ou gasoso) e ainda quanto a sua origem (Ambiente Brasil, 2011).

De acordo com a ABNT (2004) os resíduos sólidos são classificados quanto a sua periculosidade ao meio ambiente e saúde pública:

- ✓ Classe I – Perigosos;
- ✓ Classe II – Não Perigosos;
- ✓ Resíduos classe II A – Não inerte;
- ✓ Resíduos classe II B – Inerte.

Resíduos da classe I são aqueles que apresentam periculosidade conforme características seguintes: Explosão; combustibilidade; inflamabilidade; nocividade para a saúde por inalação ingestão ou penetração cutânea; irritabilidade; toxicidade; cancerígenos; infecciosos; corrosivos; teratogênicos e mutagênicos; entre outros. Estas características são definidas de acordo com a ABNT, (2004) NBR 10004.

Os resíduos da Classe II A - não inertes não se enquadram nas definições da Classe I e Classe II B. Os não inertes apresentam propriedades tais como: solubilidade em água ou combustibilidade e biodegradabilidade.

Resíduos Classe II B - Inertes são resíduos que submetidos a um teste de solubilização não tenham nenhum dos seus constituintes solubilizados, em concentrações superiores aos padrões. Como exemplos podemos citar: rochas, tijolos, vidros, plásticos (alguns tipos) e borrachas. São aqueles que quando depositados em aterro, não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas importantes.

Segundo Filho e Ferreira (1995), a reciclagem é uma forma muito atrativa de gerenciamento de resíduos, pois transforma o lixo em insumos para a indústria, com diversas vantagens ambientais. Ajuda a poupar valioso espaço do aterro sanitário, reduz sensivelmente o consumo de energia e contribui para a economia aos recursos naturais e bem-estar da comunidade.

3.3.1. Disposição Final do Resíduo Sólido

É comum vermos os impactos ambientais causados pela deposição de resíduos gerados por indústrias em locais e de formas impróprias. Neste sentido, é de suma importância estudos que visem meios alternativos de disposição que não agridam o meio ambiente (Catapreta, 1999).

São descritos abaixo alguns meios de disposição de resíduos sólidos:

✓ Lixões: local cujo lixo é depositado a céu aberto sobre o solo sem qualquer controle ou cuidado ambiental, poluindo tanto o solo, quanto o ar e as águas subterrâneas e superficiais das vizinhanças (Ambientebrasil, 2011).

✓ Aterro sanitário: tido como uma solução prática é um método para disposição final dos resíduos sólidos urbanos, sobre terreno natural, através de confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente, solo. Após o esgotamento do aterro, essas áreas podem ser descontaminadas e utilizadas para outras finalidades (Ambientebrasil, 2011).

✓ Coprocessamento: Coprocessamento é o sistema utilizado com o uso de resíduos industriais e/ou urbanos, no processo de fabricação do cimento, a fim de gerar energia e/ou recuperação de recursos e resultar na diminuição do uso de combustíveis fósseis e/ou substituição de matéria-prima.

✓ Incineradores: processo de decomposição térmica. Apresenta a vantagem de reduzir bastante o volume de resíduos. Além disso, destrói os microrganismos que causam doenças, contidos principalmente no lixo hospitalar e industrial (Ambientebrasil, 2011).

✓ Compostagem: É um tratamento aeróbico, na qual propicia um destino útil para os resíduos orgânicos, evitando sua acumulação em aterros e melhorando a estrutura dos solos. Neste a matéria orgânica é transformada em adubo ou composto orgânico (Ambientebrasil, 2011).

✓ Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos. É considerado o melhor método de destinação do lixo, em relação ao meio ambiente, uma vez que diminui a quantidade de resíduos enviados a aterros sanitários, além de poderem ser reutilizados para fabricação de novos produtos (Valle, 2004).

3.3.2. Resíduo de Construção Civil no Brasil

A indústria civil é uma das principais fontes de degradação ambiental, com enorme geração e má deposição de resíduos das diferentes etapas do processo produtivo. Os resíduos de construção e demolição (RCD) representam atualmente cerca de 41 a 70% dos resíduos urbanos gerados, assim buscando a necessidade de meios a que viabilizem o emprego desses resíduos como matérias-primas na confecção de novos materiais. (Dias, 2007)

CONAMA (2002), define resíduo de construção e demolição como “*Resíduos provenientes de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc.*”

Atualmente a reciclagem de RCD tem sido estudada para viabilizar o emprego deste em argamassas, concretos, pavimentos asfálticos e cerâmicas. Sendo de suma importância que o setor de construção civil consiga reciclar seu próprio resíduo a fim de diminuir responsabilidade ambiental (Dias, 2007).

3.4. Reciclagem do Vidro

Atualmente existem 3 tipos de reciclagem, que englobam o vidro automotivo, o plano e o de embalagem.

Para que os cacos de vidro possam ser reaproveitados através do processo de reciclagem, é necessária a seleção de um material homogêneo para que possa ser incorporado na fabricação de novos vidros.

O processo inicia-se com a separação do material, e então os cacos são levados a uma máquina para trituração. Ocorre ainda uma lavagem para retirada de impurezas. Após seu tratamento o resíduo torna-se matéria-prima para diferentes produções, podendo ser reaproveitado na indústria vidreira, cujo resíduo entra na composição da mistura como matéria-prima da mesma forma que a areia, barrilha, feldspato; e na indústria cerâmica. A Figura 3.9 representa o ciclo de reciclagem do vidro.



Figura 3.9 – Ciclo de reciclagem do vidro (Guia do vidro, 2011).

A reciclagem do vidro proporciona uma série de vantagens para a sociedade e o meio ambiente. Podemos citar o aumento da vida útil dos aterros sanitários, a geração de emprego e renda no processo de captação e comercialização do caco de vidro. E ainda podemos destacar a economia de energia no processo de fusão. Para cada 10% de caco de vidro na mistura economiza-se 2,5% da energia durante a fusão nos fornos industriais.

3.4.1. Limitações para Reciclagem de Vidros

A grande preocupação em relação à reciclagem de vidros é sobre a contaminação, pois os cacos encaminhados para reciclagem vêm misturados com impurezas que prejudicam no processamento de novos vidros.

Normalmente o vidro plano não é utilizado no processo de reciclagem convencional devido a sua composição química. No entanto, algumas indústrias de vidro, como fabricantes de embalagens já incorporam percentuais de vidro plano na produção. Os cacos não devem estar misturados com terra, pedras, cerâmicas e louças, pois são contaminantes que quando fundidos junto com o vidro, podem causar defeitos nas embalagens (Santos, 2009).

Atualmente, existe uma série de tecnologias que visam à reciclagem de vidros como; a refusão do resíduo de vidro para fabricação de novos vidros, adição como

agregado ao cimento Portland, agregado para cimento asfáltico, fabricação de cerâmica celular e fabricação de novos revestimentos.

3.5. Trabalhos Científicos Desenvolvidos com Resíduo de Vidros em Material Cerâmico

Nesta seção serão apresentados trabalhos científicos que propuseram a incorporação de vidros (tipo sodo-cálcicos) em materiais cerâmicos.

Bragança e Bergmann (2004) estudaram a viabilidade da produção de uma massa industrial de cerâmica branca, substituindo-se feldspatos por pó de vidro proveniente de embalagens transparentes (vidro sodo-cálcico). Os autores constataram que a substituição dos fundentes por pó de vidro na massa industrial, não ocorreu diferenças nas propriedades finais das peças, sendo resistência mecânica e características de gresificação semelhante da massa de porcelana industrial. Logo foi possível a redução de quantidade de fundentes de 50% da massa industrial para 20% com pó de vidro, mantendo-se a mesma temperatura de queima utilizada na indústria de 1240°C.

Dondi *et al.*, (2009) avaliaram a incorporação de resíduos de vidros da tela de monitores de computadores e vidro do tubo de TV na fabricação de tijolos e telhas. Dos resultados obtidos foi possível afirmar que o uso dos dois tipos de vidros são tecnologicamente viáveis para incorporações em cerâmica vermelha, uma vez que com a redução da plasticidade, houve uma melhora na sinterização durante a queima.

Foram utilizadas neste estudo duas massas argilosas para fabricação de telhas (M) e tijolos (c). Nessas massas foram realizados estudos de composição química, mineralógica e distribuição de tamanho de partícula.

Nos resíduos foi analisado a composição química, onde podemos notar na Tabela 3.3 os principais elementos presentes.

Tabela 3.3 – Composição química dos vidros utilizados (Dondi *et al.*, 2009).

(% em peso)													
Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	ZrO ₂	BaO	SrO	PbO	PF
Vidro do tubo	51,6	3,6	3,8	1,9	0,1	6,1	7,5	0,1	0,2	0,8	0,7	23,1	<0,1
Vidro do painel	62,7	2,3	1,0	0,3	0,1	7,4	7,1	0,4	1,9	8,4	7,6	0,4	<0,1

As formulações de massa/resíduo preparadas foram: massa argilosa sem adição de vidro (C0 e M0), e com adições de 2 e 5% em peso de vidro de tubo (CT2, CT5, MT2 e MT5) ou vidro de painel (CS2, CS5, MS2 e MS5). Todos os corpos de prova foram sinterizados nas temperaturas de 900, 950 e 1000°C.

Dos resultados obtidos, as amostras com incorporação de até 2% de vidro não trouxeram mudanças significativas no desempenho tecnológico. Por outro lado, as amostras com incorporações de até 5% em peso do vidro tiveram efeitos deletérios nas propriedades tecnológicas, em particular na resistência mecânica. Portanto, a quantidade de resíduo adicionado as duas massas cerâmicas estudadas para se obter resultados aceitáveis está entre 2 e 4% em peso de vidro.

Youssef *et al.*, (1998) incorporaram resíduo de vidro sodo-cálcico em massas cerâmicas para a produção de pisos e azulejos. As matérias-primas utilizadas foram argila, chamote, quartzo, feldspato e resíduo de vidro, cujas foram caracterizadas química e mineralogicamente. Foram ainda realizados testes de resistência mecânica, análise térmica gravimétrica e microscopia eletrônica de varredura. Nota-se que amostras com até 23% de vidro sodo-cálcico e sinterizadas a 1100°C apresentaram os melhores resultados de resistência mecânica, enquanto amostras com até 33% do resíduo foram recomendados para utilização em pisos; e com até 50% de resíduo para utilização na fabricação de azulejos, uma vez que apresentaram boa resistência a ácidos e a álcalis.

Os resultados provaram que o uso do resíduo é viável, pois além de melhorar a resistência mecânica das amostras, seu uso como aditivo substituindo matérias-primas caras é viável economicamente.

Luz e Ribeiro (2007) estudaram os efeitos da adição de um resíduo de vidro, com teores de 5 e 20% em massas cerâmicas para produção de grés porcelanato. As temperaturas analisadas neste trabalho para a queima das peças variaram entre 1000 a 1250°C. Os resultados mostraram que o resíduo do pó de vidro atuou como fundente, em substituição parcial ao feldspato, assim melhorando o processo de densificação. As amostras referentes à composição 25% de Feldspato e 5% de vidro, apresentaram os melhores resultados de retração linear, absorção de água, módulos de ruptura e de Weibull.

Tarvornpanich e Souza (2007) investigaram a incorporação de resíduo vidro sodo-cálcico em substituição parcial de fundentes naturais, como feldspatos e

nefelina-sienito para produção de porcelanas. Foram utilizados como matérias-primas argila caulínica, quartzo e resíduo de recipientes de vidro (como fundente). As percentagens de vidro adicionadas a massa foram de 6.25, 12.5, 18.74 e 20%, sendo as peças queimadas nas temperaturas de 600, 800, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250 e 1400 °C. As propriedades físicas analisadas foram densidade bulk, absorção de água, retração linear; propriedades mineralógicas por difração de raios-x (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados de DRX mostraram a formação de outras fases como, a wollastonita, plagioclásio e cristobalita com a substituição de feldspatos por resíduo de vidro. Das propriedades físicas analisadas as amostras contendo 6.25% de resíduo os valores de absorção de água e densidade chegaram respectivamente a 0% e 2,40 gm/cm³, sendo comparável a porcelanas comerciais, sinterizadas a 1200°C. Esses resultados confirmam que é viável a utilização de resíduos de vidro sodo-cálcicos como substituto parcial de fundentes naturais na indústria de cerâmica branca.

A Tabela 3.4 ilustra a composição química de vidros sodo-cálcicos presente em alguns trabalhos citados. Nota-se que as amostras são compostas majoritariamente por SiO₂, Na₂O e CaO que são os óxidos que caracterizam o vidro como sendo um vidro sodo-cálcico. Outros óxidos aparecem em menores quantidades, como óxido de magnésio e alumina. Os óxidos de sódio e cálcio são os principais modificadores de rede, sendo o Na₂O responsável pela fluidez e solubilidade que o vidro apresenta e o CaO presente em grande quantidade responsável pela devitrificação do vidro.

Tabela 3.4 – Composição química do resíduo do vidro sodo-cálcico.

Composições (% em peso)	Trabalhos científicos			
	Bragança e Bergmann (2004)	Youssef <i>et al.</i> , (1998)	Luz e Ribeiro (2007)	Tarvornpanich e Souza (2007)
SiO₂	70.28	77.07	72.40	73.96
Na₂O	14.25	5.20	13.60	11.72
CaO	11.20	7.47	8.60	11.95
MgO	1.61	1.61	4.00	0.75
Al₂O₃	2.21	0.98	0.70	0.96
K₂O	0.33	4.65	0.30	1.22
Fe₂O₃	0.08	0.86	0.11	0.10
TiO₂	0.04	-	0.02	0.10

3.6. Trabalhos Científicos Desenvolvidos com Resíduos de Vidros Planos em Cerâmica Vermelha

Diversos trabalhos têm sido realizados a fim de buscar novas maneiras de reaproveitar os resíduos de vidros oriundos de várias áreas. Dentre os trabalhos desenvolvidos, uma grande parcela refere-se ao reaproveitamento dos resíduos de vidro como matéria-prima alternativa ou fundente, aplicados em cerâmica vermelha. Abaixo serão apresentados sucintamente alguns destes trabalhos.

Pereira Filho *et al.*, (2002) utilizaram em seu trabalho vidros planos automotivos também conhecidos por vidros sodo-cálcicos, na forma de pó. O resíduo foi adicionado a uma argila Taguá da região de Jundiaí/SP, que é freqüentemente utilizada para a fabricação de blocos e telhas cerâmicas, nos teores 5, 10, 15, 20 e 25 % em peso. O pó de vidro foi peneirado a 200 #. Os corpos de prova foram sinterizados a 950°C, para então serem analisadas propriedades cerâmicas, como retração linear, absorção de água, porosidade, massa específica aparente e resistência mecânica à flexão. Seus resultados mostraram que quanto maior o teor de vidro adicionado consegue-se uma redução sensível na absorção de água (8,5% para 3,5%) e porosidade (17,2% para 9,8%), bem como um aumento expressivo na resistência à flexão (11,8 para 31,3 MPa), como ilustrado nas Figuras 3.10 e 3.11. Tais propriedades analisadas reforçam a idéia que este resíduo pode ser perfeitamente usado na fabricação de produtos cerâmicos.

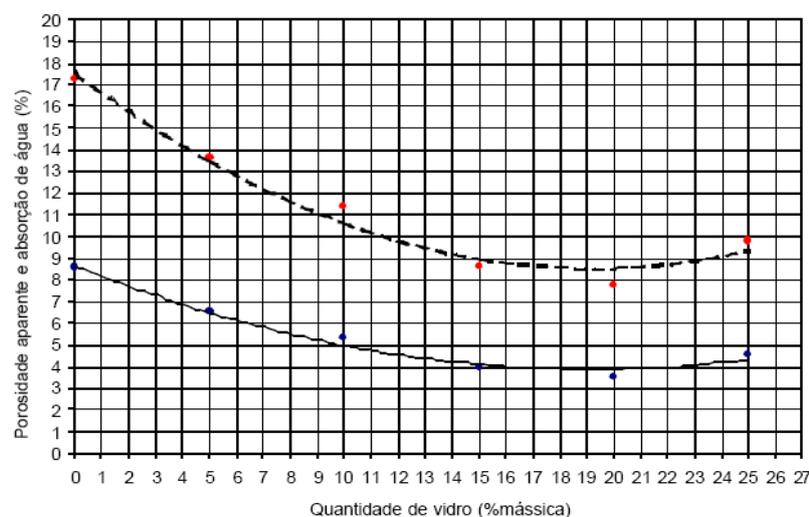


Figura 3.10 – (a) Gráfico de porosidade aparente e absorção de água.

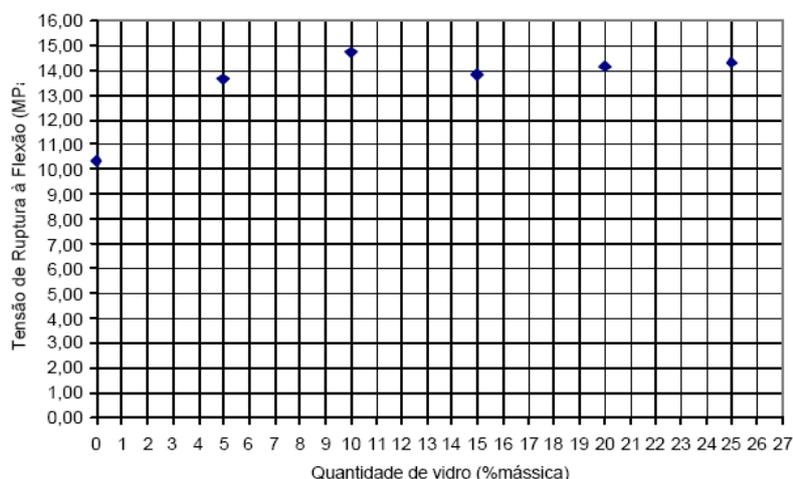


Figura 3.11 – Gráfico de tensão de ruptura a flexão.

Godinho *et al.*, (2004 a, b) incorporaram três tipos de vidros (vasilhame, plano, e de tubo de TV), em uma massa argilosa usada na fabricação de telhas e avaliaram o comportamento de densificação das peças. As amostras foram sinterizadas nas temperaturas de 900, 975 e 1050°C. Em comparação as amostras com argila pura, as composições com adições de vidro mostraram uma queda nos valores de absorção de água, e um aumento para a retração de queima e resistência à flexão. Os valores para as composições com vidro de vasilhame e plano apresentaram influência similar nos parâmetros estudados. Já a composição tendo vidro de tubo de TV mostrou uma menor influência, resultado da sua granulometria mais grosseira.

Análise de DRX, realizada pelos autores, mostrou que as composições para as três temperaturas de queima não revelaram qualquer diferença quanto às fases mineralógicas identificadas, resultado da mesma interação entre a argila e os diferentes vidros.

De acordo com a Figura 3.12, observa-se que a adição de vidro nesta quantidade influenciou as propriedades medidas, comparando-se com as propriedades dos corpos preparados com a massa sem adição de vidro. A adição de vidro diminuiu a absorção de água, aumentou a retração de queima e aumentou a tensão de ruptura.

Quanto à influência de cada tipo de vidro adicionado, percebe-se que o pó de vidro de vasilhame foi o que mais influenciou as propriedades das amostras, seguido pelo vidro plano e o de tubo de TV.

Este tipo de comportamento pode ser entendido analisando-se a dispersão dos aditivos na massa argilosa, a quantidade de óxidos fundentes e o tipo de interação entre a argila e cada tipo de vidro em função da temperatura de queima. Os vidros de vasilhame e plano possuem praticamente as mesmas quantidades de óxidos alcalinos. Espera-se que eles tenham o mesmo tipo de interação com a argila e pequena diferença observada nas propriedades pode ser creditada à maior finura do vidro de vasilhame, que propiciou uma melhor dispersão de suas partículas entre as partículas da argila.

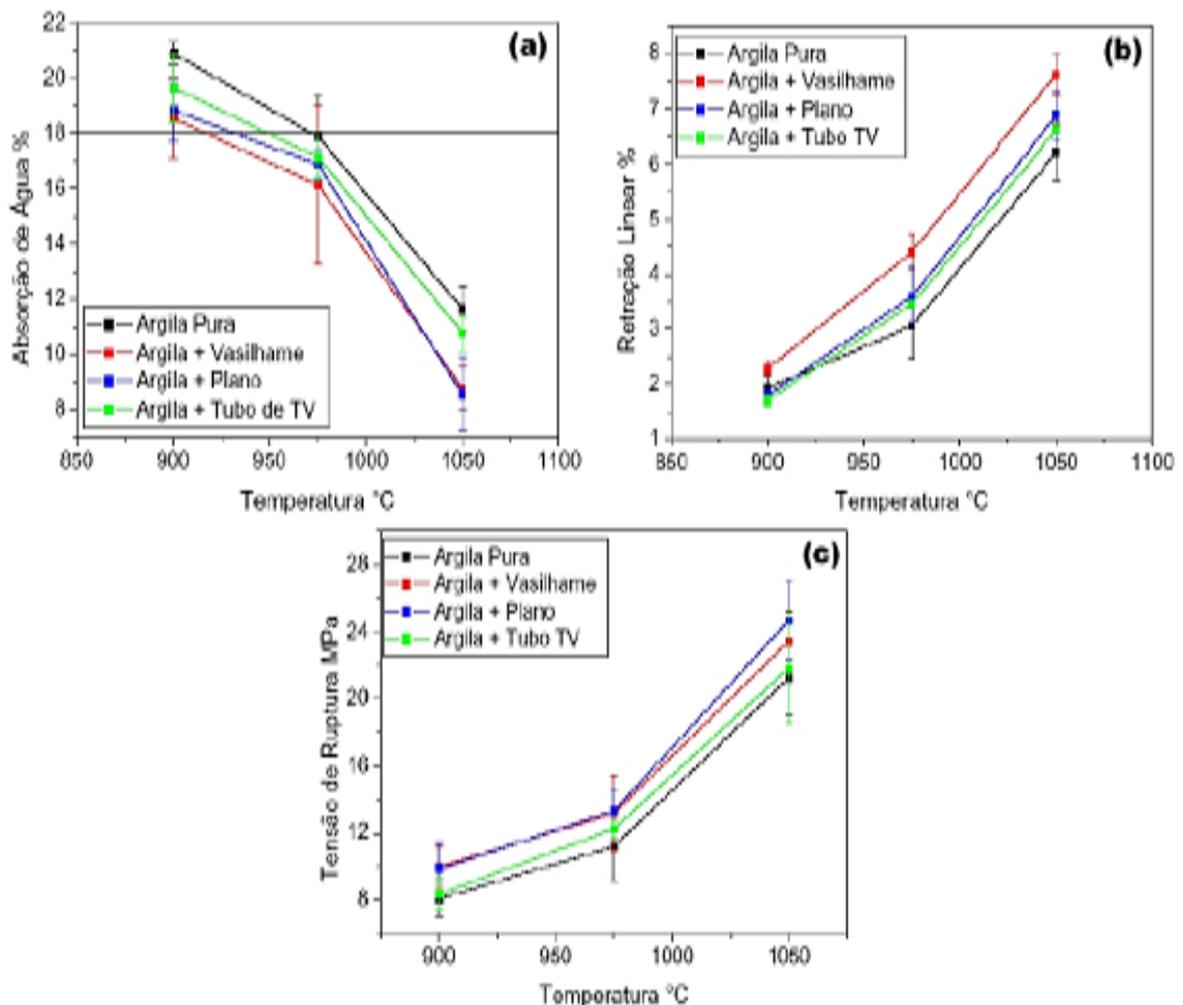


Figura 3.12 – Propriedades tecnológicas da incorporação de resíduos de vidros em massa cerâmica argilosa (Godinho *et al.*, 2004)

Com relação ao vidro de tubo de TV, este foi o que menos influenciou as propriedades. No entanto, este tipo de vidro apresentou a menor adição em volume e é também o mais grosseiro de todos. Apesar disso, seu comportamento não esteve tão abaixo. Este tipo de vidro possui menor quantidade de óxidos alcalinos,

entretanto possui grande quantidade de óxido de chumbo. Este óxido é adicionado em tubos de TV para aumentar a absorção de raios-X, bem como para ajustar a viscosidade de trabalho para um largo intervalo de temperatura. Os autores concluíram que a adição de vidro alterou a composição da massa, elevando os teores de óxidos fundentes. Isto, em princípio, auxilia a densificação da estrutura. Os resultados indicaram que a adição de vidro realmente ajuda a densificar a estrutura, pois a diminuição da absorção de água e o aumento da retração linear são sinais claros da maior densificação estrutural. Foi também verificado que o aumento da tensão de ruptura é consequência da diminuição da porosidade. Quanto maior a quantidade de fundente e melhor a dispersão, maior será o efeito do aditivo sobre a densificação.

Grespan Setz *et al.*, (2001) trabalharam com pó de vidro sodo-cálcico, incorporado em massa de cerâmica vermelha. O pó de vidro utilizado no estudo foi proveniente da etapa de polimento de fabricação de peças de vidro, e as peças incorporadas com o resíduo foram caracterizadas por absorção de água, retração linear e resistência à flexão em três pontos. Por causa da dispersão dos resultados nos materiais cerâmicos, os autores usaram o método estatístico de Weibull para comparar a resistência mecânica contendo diferentes teores de pó de vidro. As formulações estudadas apresentam 0, 6 e 13% em peso de vidro e a temperatura de queima foi de 1000°C.

Os autores concluíram que a adição do resíduo aumenta a retração linear e diminui a absorção de água. Os resultados de tensão de ruptura, o maior valor encontrado pelos pesquisadores é para a composição com 6% de vidro ($11,3 \pm 8,2$ MPa) seguido de perto da composição que possui 10% ($10,7 \pm 4,5$ MPa). Nas conclusões, os autores relatam que a adição do vidro em pó aumenta a tensão de ruptura obtida pelo método de Weibull (do corpo queimado), reduz a absorção de água e aumenta a retração linear quando comparados com os corpos de prova confeccionados somente com uma argila Taguá.

Godinho *et al.*, (2005) investigaram o efeito da adição de diferentes tipos de pó de vidro sob as propriedades tecnológicas como a absorção de água, retração linear e tensão de ruptura de uma massa argilosa usada normalmente para a fabricação de telhas. Foram usados vidros de vasilhames, de janela (vidro plano) e do funil de tubo de televisão. As formulações estudadas apresentaram teores de 6, 13 e 20% em peso de resíduo e foram sinterizadas em três temperaturas 900, 975 e 1050°C.

Dos resultados obtidos nota-se que os três tipos de vidros empregados possuem efeito positivo na sinterização de uma massa cerâmica freqüentemente usada para a fabricação de telhas. Observa-se também que o vidro de tubo de televisão formou fase líquida em menores temperaturas, devido a este resíduo ser mais rico em óxidos fundentes. Isto explica a maior influência deste tipo de aditivo em algumas massas. A Tabela 3.5 ilustra a composição química dos vidros estudados por (Godinho *et al.*, 2005).

Tabela 3.5 – Composição química dos vidros utilizados (Godinho *et al.*, 2005)

(% em peso)									
Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PbO	PF
Vidro plano	65,75	0,66	12,5	3,05	0,12	16,71	0,74	<0,01	0,48
Vidro de embalagens	67,49	0,90	12,60	0,10	0,09	16,65	0,79	<0,01	0,51
Vidro tubo de TV	48,60	1,68	2,80	1,80	0,11	7,31	7,68	24,96	0,67

Loryuenyong *et al.*, (2009) desenvolveram um estudo com o intuito de investigar a incorporação de vidro plano utilizado na construção civil em uma massa cerâmica utilizada na fabricação de tijolos. As propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas em função da quantidade de resíduo de vidro adicionado à massa e da temperatura de queima. As amostras foram preparadas com incorporações do resíduo de vidro de 0, 15, 30 e 45% em peso. A etapa de sinterização ocorreu com temperaturas que variaram de 1000 a 1200°C.

A Figura 3.13 mostra as micrografias obtidas por MEV das peças cerâmicas incorporadas com 30% do resíduo de vidro em função da temperatura de queima. Pode-se observar que à medida que a temperatura de queima foi aumentado, as fases de vidro tornou-se mais vitrificadas. Ao aumentar temperatura de queima, as partículas de vidro foram eventualmente fundidas, reduzindo a porosidade total, contribuindo para a densificação da cerâmica.

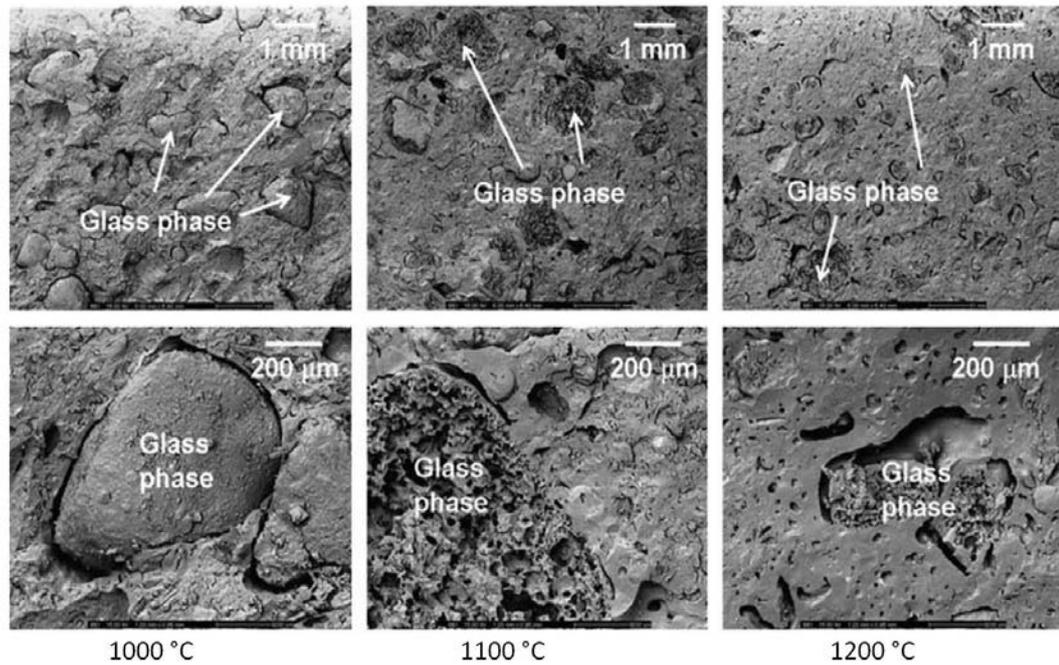


Figura 3.13 – Micrografias por MEV das cerâmicas com 30% de vidro queimadas nas três temperaturas (Loryuenyong *et al.*, 2009)

A Figura 3.14 mostra as micrografias das cerâmicas com diferentes teores de vidro. Na figura, as fases de vidro foram distribuídos uniformemente nos corpos cerâmicos. O aumento da quantidade de vidro gera um aumento nas fases de vidro na microestrutura.

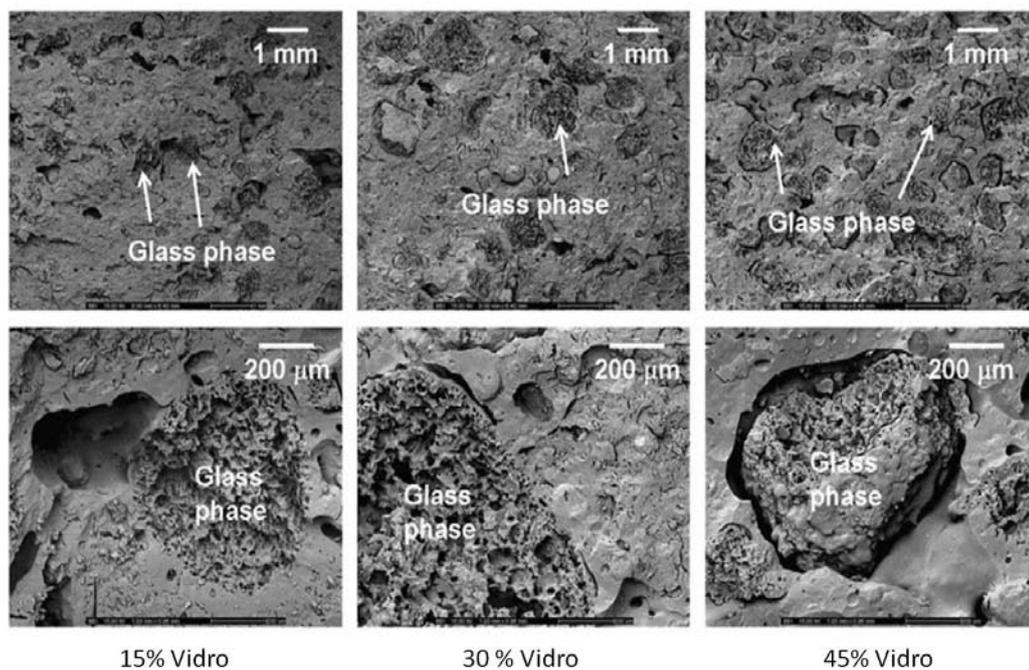


Figura 3.14 – Micrografias por MEV das cerâmicas com 15, 30 e 45% de vidro queimadas 1100°C (Loryuenyong *et al.*, 2009)

As fases cristalinas identificadas por DRX nas amostras contendo de 0 a 30% em peso de resíduo incorporado, queimados a 1100° C são mostradas na Figura 3.15. Os resultados indicaram a presença de novas fases, que aumentaram conforme aumentou a quantidade de resíduo. Estas fases foram identificadas como a cristobalita e a albita. A formação da fase mulita em alta temperatura de queima foi devida a transformação de fase da caulinita. As menores intensidades da mulita observadas nas peças com 15 e 30% de vidro, em comparação com a argila pura, estão associadas à menor quantidade de alumina presente.

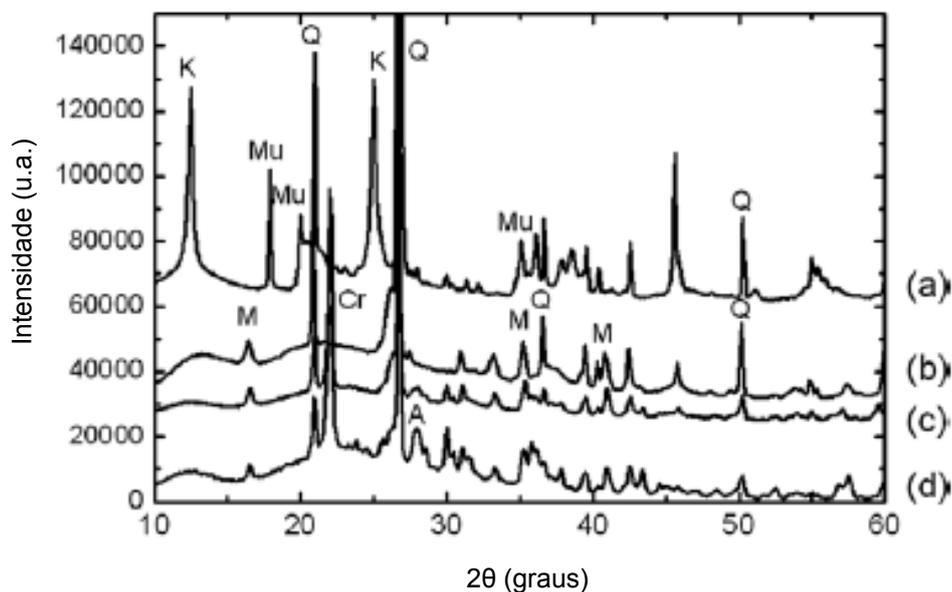


Figura 3.15 – Difractogramas da massa cerâmica crua e sinterizada a 1100°C (a) massa crua sem resíduo de vidro, (b) 0% em peso de vidro; (c) 15% de vidro e (d) 30% em peso de vidro. Q - quartzo, M - mulita, Cr - cristobalita, A - albita, Mu - muscovita e K - caulinita.

(Loryuenyong *et al.*, 2009).

Os resultados também indicaram que a incorporação do resíduo em massa cerâmica, em quantidades adequadas, melhora propriedades físicas e mecânicas das peças. A resistência à compressão aumentou de 26 para 41 Mpa e absorção de água reduziu de 2 para 3% nas amostras contendo 15 e 30% de resíduo de vidro. Estes resultados foram acentuados com temperatura de queima de 1100°C. Neste sentido, os autores sugerem 1100°C como a temperatura de queima mais apropriada. A resistência mecânica da cerâmica com 45% em peso de vidro incorporado diminuiu enquanto, a absorção de água e porosidade aberta foram

significativamente aumentadas. Neste sentido, esta quantidade se apresenta como não adequada para incorporação em massa cerâmica para fabricação de tijolos.

Nos últimos anos diversos trabalhos têm sido reportados na literatura (Loryuenyong *et al.*, 2009; Godinho *et al.*, 2005; Grespan Setz *et al.*, 2001; Pereira Filho *et al.*, 2002), sobre a incorporação de resíduo de vidro plano em cerâmica vermelha.

O trabalho realizado por Loryuenyong *et al.*, 2009, investigou o comportamento de um vidro plano, com características similares a do vidro investigado nesta pesquisa, para incorporação em cerâmica vermelha. Entretanto é importante ressaltar que Loryuenyong *et al.*, 2009, trabalhou em temperaturas mais elevadas, de 1000 a 1200°C, sendo esta a característica que diferencia da pesquisa proposta neste trabalho.

Os trabalhos (Grespan Setz *et al.*, 2001; Pereira Filho *et al.*, 2002; Godinho *et al.*, 2005), pesquisaram os efeitos da incorporação do resíduo do vidro plano em cerâmica vermelha, porém o teor de resíduo de vidro adicionados mais baixo, máximo de 25% de vidro plano incorporado a massa argilosa.

O diferencial da pesquisa proposta neste trabalho foi temperatura de queima e teor de resíduo de vidro adicionado à massa argilosa. Para a queima das peças cerâmicas foram utilizadas temperaturas mais baixas, de 850 a 1050°C. A escolha das temperaturas de queima foi influenciada pela temperatura de amolecimento a 810°C e pela temperatura de fusão a 1115°C do resíduo de vidro plano, mostradas na Figura 5.3.

Outro ponto importante deste trabalho quando comparado com as literaturas citadas no capítulo anterior, foi a investigação do resíduo de vidro incorporado a cerâmica vermelha em teores mais elevados, até 40% em peso.

É importante ressaltar que o pólo de cerâmica vermelha de Campos dos Goytacazes apresenta limitações quanto à qualidade dos fornos, devido a isto a queima das peças cerâmicas é realizada em temperaturas mais baixas, sendo a temperatura máxima de 1050°C. Isto significa que esta temperatura máxima não é suficiente para o fechamento dos poros das argilas caulínicas de Campos dos Goytacazes, que apresentam alta refratariedade (Vieira *et al.*, 2005).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foram descritos os materiais e matérias-primas que serão utilizadas para a realização deste trabalho. A Figura 4.1 apresenta o fluxograma das etapas a serem desenvolvidas.

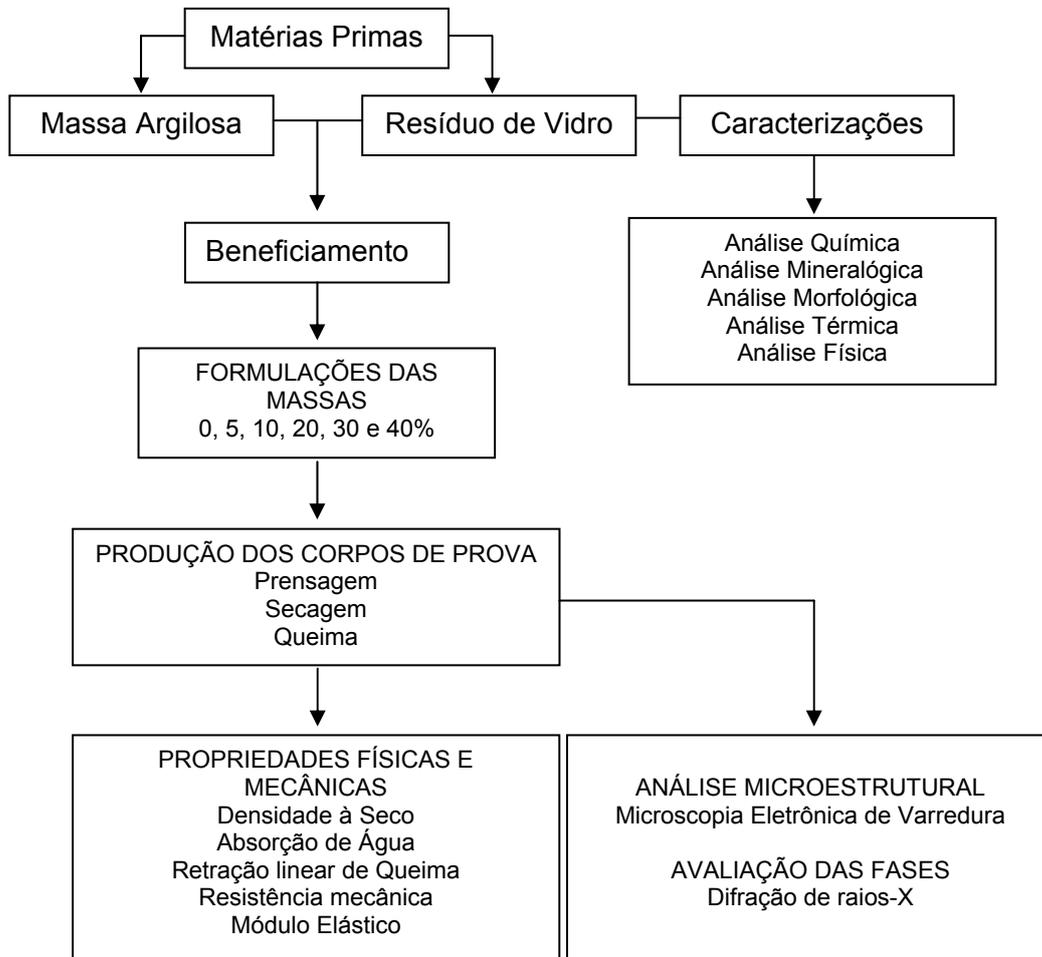


Figura 4.1 – Fluxograma das etapas envolvidas na parte experimental nesse projeto.

4.1. Materiais

Foram utilizadas como matéria-prima para o desenvolvimento deste trabalho uma massa argilosa avermelhada da Cerâmica Rodolfo de Azevedo Gama, de Campos dos Goytacazes-RJ e o resíduo de vidro plano (RVP) proveniente de atividades de reciclagem, cedido pela Empresa MASSFIX, cuja composição química é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química do resíduo do vidro plano (% em peso). Fonte: MASSFIX.

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	ZnO	Fe ₂ O ₃	NiO	CuO	PbO	TiO ₂	PF
15,47	3,19	0,68	70,85	0,17	8,45	0,03	0,34	0,01	0,01	0,08	0,06	0,55

A massa argilosa avermelhada é usada no Pólo de Cerâmica Vermelha localizada no município de Campos dos Goytacazes – RJ, para fabricação de tijolos e blocos cerâmicos.

4.2. Métodos

Foram realizadas na parte experimental as caracterizações das matérias-primas e formulações das massas, com o intuito de determinar as propriedades químicas, físicas, mecânicas, térmicas e microestruturais.

4.2.1. Beneficiamento das Matérias-Primas

Após coleta, a argila foi seca em estufa de laboratório a 110°C durante 24 horas, e posteriormente será desagregada manualmente com almofariz e pistola de porcelana até passagem completa em peneira de 35 mesh.

O resíduo de vidro foi lavado em água corrente e então seco em estufa a 110°C. O resíduo será obtido na forma de pó, passante na peneira 200 mesh.

4.2.2. Caracterização das Matérias-Primas

As matérias-primas foram submetidas a ensaios de caracterização mineralógica, química, térmica, física e morfológica por meio de técnicas de como difração de raios-X, fluorescência de raios-X, análise térmica diferencial e termogravimétrica, dilatométrica, análise granulométrica e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4.2.2.1. Difração de Raios-X (DRX)

A análise mineralógica para identificação das fases cristalinas presentes foi realizada através da técnica de difração de raios-X (DRX) pela UFRJ, em um

equipamento de modelo Shimadzu XRD 6000, nas seguintes condições de operação: radiação Cu K α (35 kV/40 mA); velocidade do goniômetro de 0,02° 2 θ por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo e coletados de 5 a 80° 2 θ .

4.2.2.2. Análise da Composição Química – Fluorescência de raios-X (FRX)

A análise química foi feita através da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X, marca Philips, modelo PW 2400. É uma técnica de análise qualitativa que foi utilizada para a identificação dos elementos presentes nas amostras.

4.2.2.3. Análise Térmica Dilatométrica Linear e Óptica

Este método foi utilizado para a identificação das variações nas dimensões do material quando submetido ao calor. Foi realizado pelo Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais – LDCM/SENAI – Criciúma, através de um *Dilatômetro da marca NETZSCH e Modelo. DIL 402 PC*. Para este ensaio foram preparados corpos de prova cilíndricos com umidade de compactação de 7% e pressão de compactação de 250 kgf/cm². A temperatura de queima máxima utilizada foi de 1180 °C, utilizando uma taxa de aquecimento: 7,5 °C/min.

4.2.2.4. Análise Térmica Diferencial

O vidro plano moído foi analisado por meio da técnica de análise térmica diferencial e Termogravimétrica (ATD/TG) para a determinação da temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de início e máximo de cristalização e temperatura de fusão da fase cristalina. As análises foram realizadas em um analisador térmico, marca NETZSCH, modelo STA 409C, no Laboratório de Análises Térmicas da USP.

4.2.2.5. Análise Granulométrica

A análise granulométrica das matérias-primas foi obtida a partir de um método combinado de peneiramento e sedimentação por gravimetria, de acordo com a norma técnica ABNT NBR-7181 (ABNT, 1984a).

4.2.2.6. Análise Morfológica

Foram utilizados um microscópio eletrônico de varredura/EDS e um microscópio ótico (MO) para a determinação da morfologia das partículas.

4.2.3. Formulações e Preparação das Massas

Esta etapa exemplificará as formulações utilizadas para o preparo das massas. A massa argilosa foi preparada utilizando-se dois tipos de argilas denominadas por (A) Argila Branca e (B) Argila Carolinho com teores de 70 e 30%, respectivamente. Nessa massa argilosa o resíduo de vidro plano foi incorporado, cujas proporções são dadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Composição das massas cerâmicas (% em peso).

Formulação	Massa Argilosa	Resíduo
F0	100	0
F5	95	5
F10	90	10
F20	80	20
F30	70	30
F40	60	40

Após secas em estufa por 24 horas, as matérias-primas foram então misturadas de acordo com as proporções dadas na Tabela 4.2, e umedecidas com 8% em peso em água.

4.2.4. Plasticidade

A plasticidade das massas cerâmicas foi obtida de acordo com as normas da ABNT NBR-7180 (ABNT, 1984a) e ABNT NBR-6459 (ABNT, 1984b). O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado por:

$$IP = LL - LP \quad (4.1)$$

Onde o limite de plasticidade (LP) é o teor de água, expresso em % do peso de pasta seca a 110°C, acima do qual a massa argilosa pode ser moldada em cilindros, com cerca de 3 a 4 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento. O limite de liquidez (LL) é o teor de água, expresso em % do peso da pasta seca a 110°C, acima do qual a massa argilosa, ensaiada no aparelho de Casagrande, ao receber 25 golpes, consegue juntar os dois lados do sulco formado na massa. Estes ensaios serão realizados no laboratório de engenharia civil da UENF.

4.2.5. Preparação dos Corpos Cerâmicos

Foram preparados 126 corpos de prova por prensagem uniaxial em prensa hidráulica, em uma pressão de compactação de cerca 20 MPa. Foi utilizando uma matriz de forma retangular (120 x 30 x 12 mm) e pistões de aço. Após a compactação as peças cerâmicas foram submetidas à secagem em estufa a 110 °C por 24 h.

Após a etapa de secagem os corpos de prova secos foram queimados em forno de laboratório tipo mufla da Maitec, modelo FL 1300. Foi utilizada uma taxa de aquecimento constante de 2°C/min, com temperaturas de patamar de 850, 950 e 1050°C. Os corpos de prova foram mantidos na temperatura patamar por 2 horas e resfriados por convecção natural, desligando-se o forno.

4.2.6. Caracterizações das amostras cerâmicas

4.2.6.1. Densidade Aparente a Seco

A densidade aparente das peças secas foi determinada pelo método dimensional, de acordo com a norma ASTM C 373-72 (1997), calculada pela seguinte expressão:

$$\rho\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{m}{V} \quad (4.2)$$

Onde ρ é a densidade bulk da peça seca (g/cm^3); m é a massa (g) e V é o volume (cm^3) dos corpos de prova secos.

4.2.6.2. Densidade Relativa

A densidade relativa foi calculada utilizando-se a seguinte expressão:

$$\rho_r = \frac{\rho_{aps}}{\rho_{real}} \quad (4.3)$$

Onde ρ_r é a densidade relativa da composição, ρ_{aps} é a massa específica a seco (g/cm^3) e ρ_{real} é a densidade real da composição (g/cm^3). A densidade real do vidro plano foi determinada por picnometria de acordo com a norma da ABNT NBR 6508, (ABNT, 1984).

4.2.6.3. Absorção de Água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma ASTM C373-72 (ASTM, 1977). Os corpos de prova foram pesados, e em seguida colocados em recipiente com água destilada e mantidos em água fervente por 2 horas, e resfriados submersos em água. Em seguida foi retirada a água superficial de cada peça, registrando-se a massa. A absorção de água (AA) foi calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$AA(\%) = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} 100 \quad (4.4)$$

Onde P_u e P_s são as massas (g) das peças saturadas em água (úmidas) e secas, respectivamente.

4.2.6.4. Retração Linear de Queima

A retração linear das peças queimadas (R_L) foi determinada com o auxílio de um paquímetro digital marca MITUTOYO (resolução $\pm 0,01$ mm), acordo com a norma MB-305 (ABNT), através da seguinte expressão:

$$R_{Lq}(\%) = \frac{(L_s - L_q)}{L_s} 100 \quad (4.5)$$

Onde L_c e L_s representam o comprimento do corpo de prova após conformação e secagem e L_q após a queima.

4.2.6.5. Tensão de Ruptura à Flexão

A tensão de ruptura à flexão foi realizada no equipamento EMIC universal. A propriedade mecânica das peças cerâmicas foi determinada de acordo com a norma ASTM C674-77 (ASTM, 1977a) através do ensaio de tensão de ruptura à flexão em três pontos (σ), pela seguinte expressão:

$$(\sigma) = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4.6)$$

Onde σ é a tensão de ruptura à flexão, (MPa); P é a carga aplicada no corpo de prova no momento da ruptura, (Newton); L é a distância entre os cutelos de apoio, (mm); b é a largura do corpo de prova, (mm); e d é a espessura do corpo de prova, (mm).

4.2.6.6. Módulo Elástico à Flexão

O módulo de elasticidade foi determinado juntamente com o ensaio de resistência a flexão dos corpos de prova. O módulo elástico (E) foi calculado a partir da relação entre tensão na flexão (MPa) e deformação (mm/mm) através da seguinte equação:

$$E = \frac{PL^3}{4\delta bh^3} \quad (4.7)$$

Onde E é o módulo de elasticidade, (MPa); P é a carga aplicada no corpo de prova no momento da ruptura, (Newton); L é a distância entre os cutelos de apoio, (mm); b é a largura do corpo de prova, (mm); e d é a espessura do corpo de prova, (mm); δ é o deslocamento no meio do corpo de prova.

4.2.6.7. Avaliação Microestrutural

4.2.6.7.1. Análise Mineralógica

A técnica de difração de raios-X foi utilizada para determinação das fases presentes nas peças queimadas. Foi utilizado para realização desta técnica o mesmo equipamento já citado no item 4.2.2.1.

4.2.6.7.2. Análise Microestrutural

A avaliação da microestrutura das cerâmicas queimadas foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), sendo o mesmo equipamento citado no (item 4.2.2.6.) e microscopia ótica (MO) em microscópio MOTIC Agar-Scientific do LAMAV/UENF.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização das Matérias-Primas

5.1.1. Análise Mineralógica

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os difratogramas de raios-X das argilas estudadas e do resíduo de vidro plano. Nota-se na Figura 5.1 que as argilas são predominantemente caulínicas, podendo também observar picos de quartzo, mica, gibsita e goetita. As argilas de Campos dos Goytacazes são constituídas essencialmente pelo argilomineral caulinita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), por isso apresentam um comportamento refratário de queima, além do desenvolvimento da plasticidade (Vieira *et al.*, 2003).

De acordo com a Figura 5.2 nota-se que não ocorre à presença de picos bem definidos, que seriam característicos de uma amostra cristalina, e sim bandas entre 10° a 40° , características de materiais predominantemente amorfos (Santos, 1989).

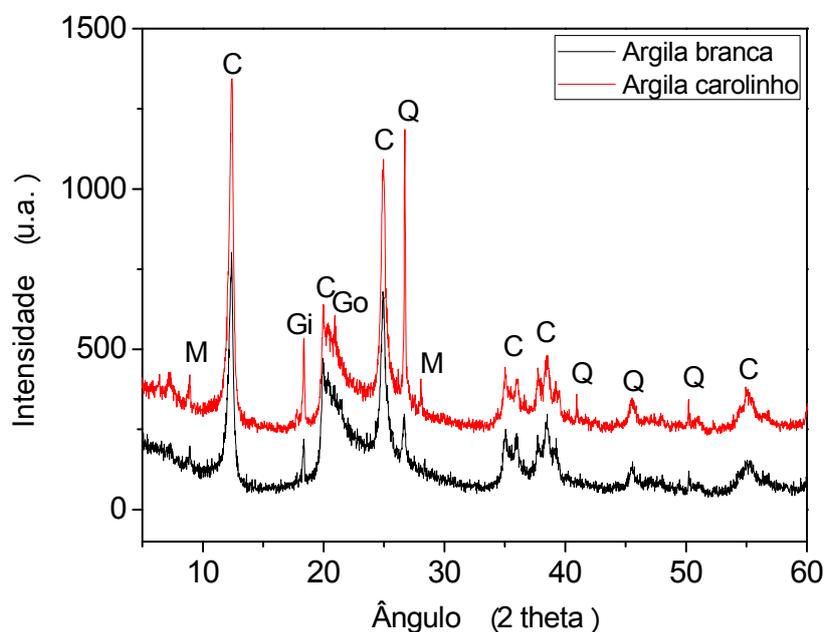


Figura 5.1 – Difratograma de raios-X das argilas. **C** = Caulinita; **Gi** = Gibsita; **Q** = Quartzito; **M** = Mica; **Go** = Goetita.

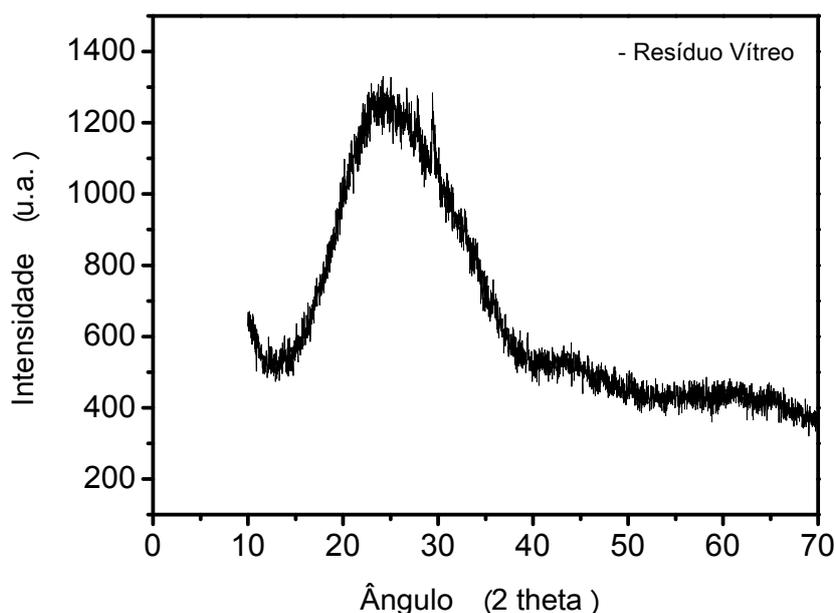


Figura 5.2 – Difratograma de raios-x do resíduo de vidro plano.

5.1.2. Análise Química

A Tabela 5.1 apresenta a composição química das matérias-primas. Nota-se pela composição química que as argilas são tipicamente cauliníticas (Vieira *et al.*, 2003), constituídas pelo elevado teor de óxidos como SiO_2 e Al_2O_3 , comprovada anteriormente pela difração de raios-x. Nas argilas, a sílica (SiO_2) apresenta-se normalmente na forma de sílica livre (quartzo) ou presente nos minerais argilosos. A alumina (Al_2O_3) que é o segundo elemento mais abundante na composição das argilas encontra-se quase sempre formando parte da estrutura dos aluminossilicatos como a caulinita e minerais micáceos. Cabe ressaltar, que a alumina também pode estar presente na forma livre, como Gibsita, mineral este que foi observado por DRX, Figura 5.1.

O óxido de ferro (Fe_2O_3), Tabela 5.1, esta presente como uma das impurezas mais freqüentes associadas às argilas ou formando parte do cristal argiloso (substituindo alumínio). Este óxido é o responsável pela coloração avermelhada das argilas.

Ainda seguindo a Tabela 5.1, observa-se a presença de óxidos fundentes como, óxido de sódio e potássio (Na_2O e K_2O). O Na_2O é mais escasso com teor de 0,22%, enquanto o K_2O varia entre 0,85 e 1,83%. Os óxidos álcalis encontram-se

nas argilas na forma de compostos insolúveis (feldspatos e micas), como íons livres no retículo cristalino de minerais (ilita) e como sais solúveis (cloretos e sulfatos). Estes óxidos estão relacionados à formação da fase vítrea em temperaturas mais baixas, quando apresentados em elevados teores.

Com relação ao resíduo de vidro plano, observa-se o elevado teor de sílica (SiO_2), seguido pelo óxido de sódio (Na_2O). São óxidos fundentes relacionados à vitrificação do material. Ainda aparecem em teores significantes os óxidos de cálcio e magnésio (CaO e MgO) como teores de 6,978 e 4,308%, respectivamente.

Tabela 5.1 – Composição química das argilas branca e carolinho e do resíduo de vidro plano [%].

Óxidos	Argila Branca	Argila Carolinho	Resíduo de Vidro Plano
SiO_2	50,14	50,79	74,47
Al_2O_3	26,93	29,15	0,76
Fe_2O_3	3,82	3,63	0,43
TiO_2	1,41	1,83	-
MgO	-	0,96	4,30
K_2O	0,85	1,83	0,18
Na_2O	-	0,22	10,93
SO_2	-	-	0,21
CaO	0,37	0,15	6,97
PF	16,0	11,84	1,8

5.1.3. Análise Térmica Dilatométrica

5.1.3.1. Análise Dilatométrica Ótica

Na Figura 5.3 apresenta-se o resultado do ensaio de dilatométrica ótica (microscopia de estágio a quente) do RVP. De acordo com a sequência de imagens obtidas, pode-se observar a contração significativa até 1078°C , após isso o material funde a 1115°C . Além disso, podem ser notadas as temperaturas de transição vítrea (T_g) e de amolecimento (T_s), a 690 e 810°C , respectivamente; onde (T_g) indica a temperatura que um material não cristalino se transforma de um líquido superesfriado em um vidro rígido e (T_s) a temperatura máxima que uma peça de

vidro pode ser manuseada sem causar alterações dimensionais significativas (Callister, 1999).

Observa-se ainda que o RVP exhibe uma faixa de trabalho, correspondente aos limites de operação de um vidro de 810 a 1078°C. Estes dados são compatíveis com os apresentados na literatura para os tipos de vidro sodo-cálcicos, variando de 700 até 1000° (Callister, 1999). A temperatura de fusão (T_f) significa que o vidro é fluido o suficiente para ser considerado líquido, neste caso a (T_f) é 1115°C.

É importante ressaltar que quando o resíduo inicia o fluxo viscoso, ou seja, passa a se comportar como líquido, seu efeito quando adicionado a uma cerâmica vermelha pode proporcionar melhores propriedades físicas e mecânicas através do fechamento de poros, isto devido à temperatura do vidro ser compatível com a temperatura da cerâmica vermelha, que resistem a temperaturas de até 1100 °C.

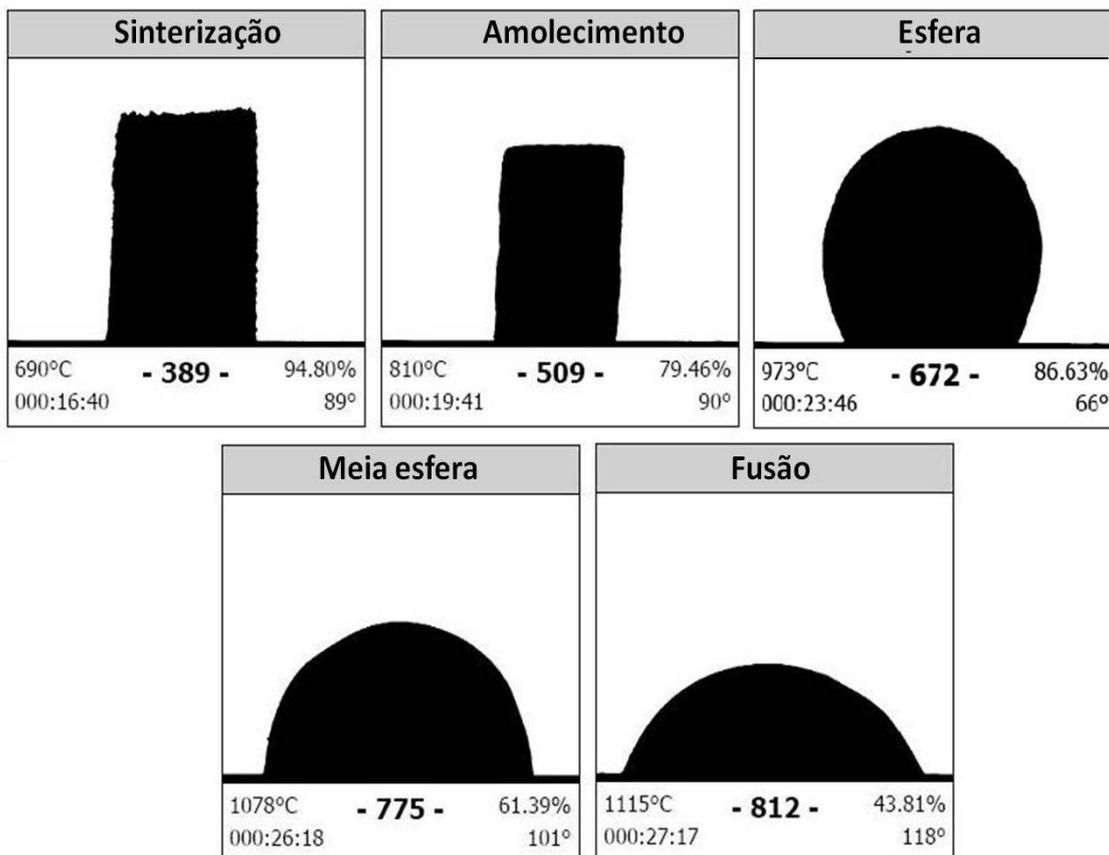


Figura 5.3 – Resultados da dilatométrica ótica para o resíduo de vidro plano.

5.1.3.2. Análise Dilatométrica Linear

A Figura 5.4 mostra as curvas dilatométricas da massa argilosa e da massa com teor de 20% de RVP.

Inicialmente não se observa uma variação dimensional significativa das composições até aproximadamente a temperatura de 500°C.

Por volta de 500 - 600°C, pode-se notar a primeira retração para as duas curvas. Esta retração inicial está associada à eliminação da água de constituição dos argilominerais, bem como a uma sinterização inicial das partículas (Monteiro e Vieira, 2004). De acordo com Pinheiro e Holanda (2010), é neste momento que ocorre a transformação da caulinita em metacaulinita.

A segunda retração ocorre por volta de 800 - 900°C e pode ser associada ao início da sinterização do pó argiloso.

Em temperaturas superiores a 1000°C, aproximadamente, a massa argilosa e com teor de 20% RVP apresentam uma retração ainda mais significativa. A brusca retração pode ser atribuída à recristalização de novas fases cerâmicas; assim como ao processo de vitrificação (Pinheiro e Holanda, 2010).

Para argilas caulínicas o início da vitrificação (formação de fase líquida) inicia-se por volta de 695°C, o que pode ser visto no diagrama de fases $K_2O_Al_2O_3_SiO_2$. Acima de 1000°C o que ocorre é a formação de fase líquida de forma mais abundante. Este ponto indica que as amostras estão parcialmente fundidas e que o líquido formado irá escoar para os interstícios das partículas mais refratárias que ainda não se fundiram. Este evento provoca a aproximação das partículas o que resulta em uma retração bem significativa. Isto significa que o resíduo entra no estado viscoso e passa a atuar no fechamento dos poros da matriz. No caso das amostras com resíduo a retração ocorre à temperatura mais baixa, mostrando que o resíduo do vidro plano atua como material fundente, diminuindo a temperatura de sinterização.

Na Figura 5.4 observa-se que a temperatura de máxima taxa de sinterização para a massa argilosa esta em torno de 1171,92°C com retração de 9,66%, enquanto para a massa contendo resíduo gira em torno de 1141,86°C com retração de 7,64%. Nota-se que a adição do resíduo alcançou uma menor retração em uma temperatura mais baixa e que o menor valor da retração, provavelmente, ocorre

devido ao aumento no grau de empacotamento a seco, que é maior para amostras contendo 20% RVP quando comparada a massa argilosa pura, Figura 5.11.

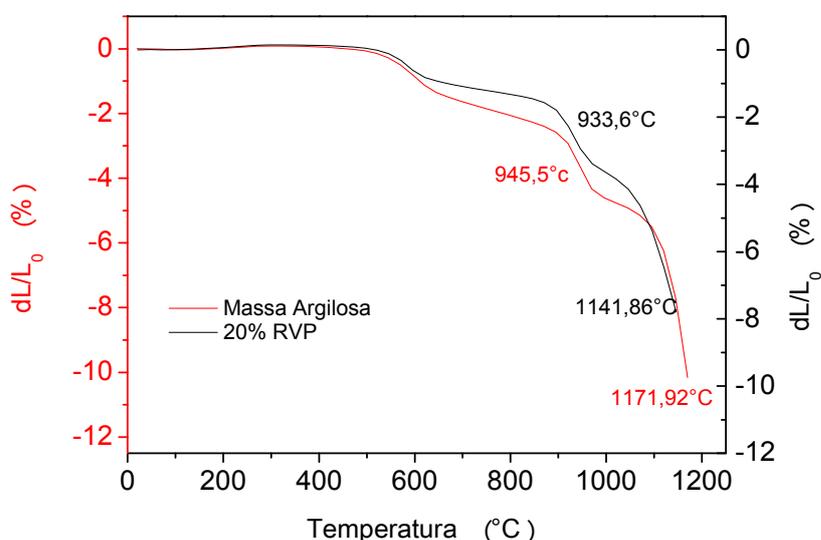


Figura 5.4 – Dilatometria linear da Massa argilosa e Massa com 20% RVP.

Segundo Vieira *et al.*, (2007), as argilas de Campos dos goytacazes conhecidas por apresentarem elevado teor de argilominerais, apresentam um início de sinterização em temperaturas mais baixas, acarretando assim em uma maior retração linear devido ao tamanho reduzido das partículas e predomínio de minerais argilosos. A “fração argila” é a principal responsável pela consolidação das partículas de uma argila na etapa de queima.

5.1.4. Análise Térmica Diferencial

A análise térmica da massa argilosa é apresentada na Figura 5.5. Nota-se uma perda de massa inicial de 3,74% devido à eliminação de água higroscópica manifestada principalmente pelo mineral micacéo (Hajjaji *et al.*, 2002).

A 279,5°C é observado um pico endotérmico com perda de massa de 3,25%, esta perda esta associada à desidratação da gibsita - $\text{Al}(\text{OH})_3$ e eventual decomposição do hidróxido de ferro (Monteiro e Vieira, 2002).

Outro pico endotérmico é observado a 512,71 °C, este pico provavelmente esta associado à desidroxilação de minerais, como a caulinita, indicada na difração de raios-x (Figura 5.1). Neste pico ocorre a maior perda de massa, 10,77%, esta elevada perda pode contribuir para o aumento da refratariedade e da retração linear.

Nota-se que a 957,73°C ocorre uma suave reação exotérmica, típica da decomposição da metacaulinita e a conseqüente formação de novas fases (Johns, 1965).

Segundo Vieira e Monteiro (2003), as curvas de ATD/TG confirmam a perda de massa do material, sendo um dos principais fatores que conferem a cerâmica após a queima, elevada porosidade.

As argilas de Campos dos Goytacazes-RJ, como pode ser observada na Figura 5x apresentam elevada perda de massa, em torno de 17,76%. Contudo, uma perda de massa típica de cerâmica com qualidade situa-se entre 5 e 7% (Vieira e Monteiro, 2003).

No resíduo de vidro plano (Figura 5.6) observa-se que o resultado da análise térmica mostra uma leve perda de massa entre 200°C e 700°C aproximadamente, na ordem de 0,04%. Neste intervalo acontecem provavelmente reações de oxidação e eliminação da matéria orgânica juntamente com a desidroxilação ou decomposição de alguns constituintes do vidro. O comportamento da curva de DTA do RVP é caracterizado por um pico endotérmico a 573°C que está associado à transformação alotrópica do quartzo α para o quartzo β e um pico exotérmico a aproximadamente 768,07°C característico da cristalização do vidro (Reis, 2007).

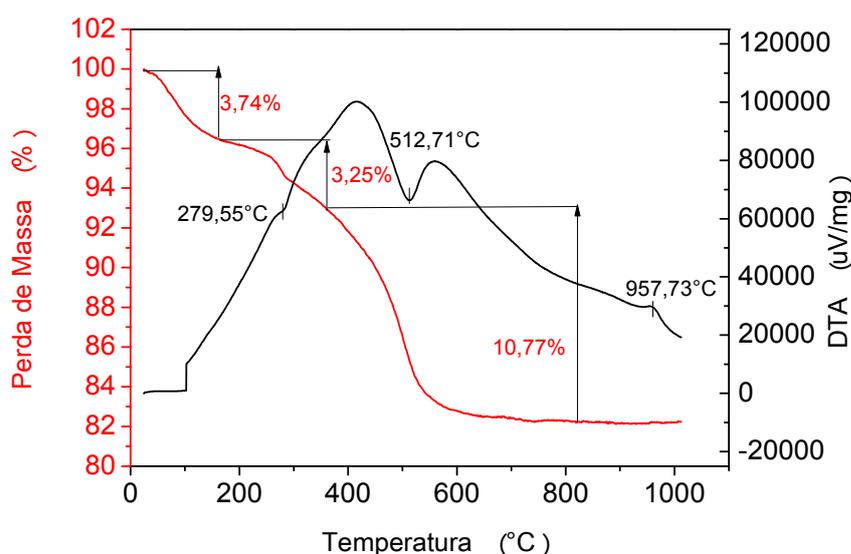


Figura 5.5 - Curva de análise térmica diferencial e termogravimétrica (DTA e TG) da Massa Argilosa.

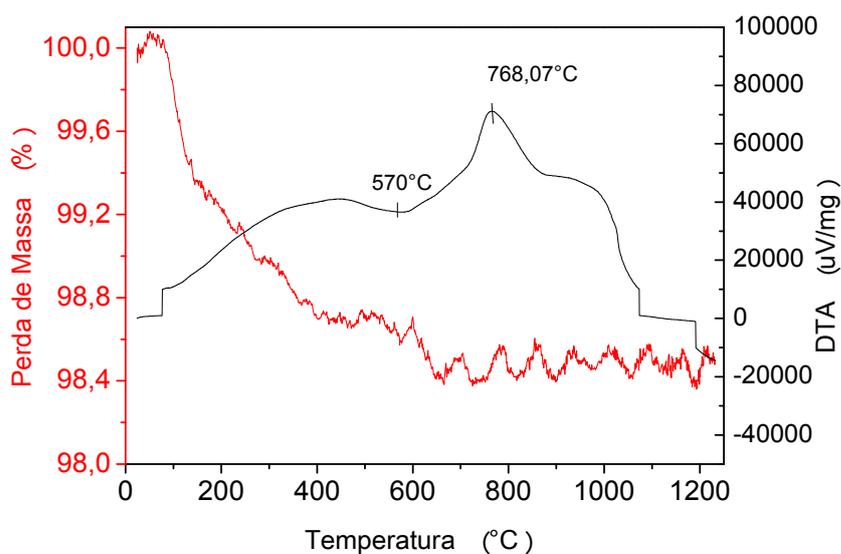


Figura 5.6 - Curva de análise térmica diferencial e termogravimétrica (DTA e TG) do resíduo de vidro plano.

5.1.5. Análise Granulométrica

A Figura 5.7 mostra a distribuição de tamanho de partículas das argilas e do resíduo de vidro plano. Observa-se que a argila branca apresenta um percentual de “fração argila” de 62,4%, isto significa um elevado percentual de argilominerais com diâmetro esférico equivalente menor que 0,002 mm, ou seja, é um material plástico. A “fração areia” considerada acima de 0,02 mm apresentou um percentual de 10,4%. O mesmo comportamento plástico ocorre para a argila carolinho com um percentual de “fração argila” de 53,3% e de “fração areia” de 17,5%. O resíduo de vidro plano comporta-se como um material não plástico com “fração areia” de 44,8% e granulometria fina de 9,8%. A densidade real das partículas medida por meio de picnometria é de 2,5 g/cm³.

É importante ressaltar que os teores de materiais plásticos e não plásticos estão relacionados diretamente com a plasticidade, podendo influenciar nos fatores tecnológicos como conformação, retração de secagem, resistência mecânica e ainda no comportamento de queima das peças.

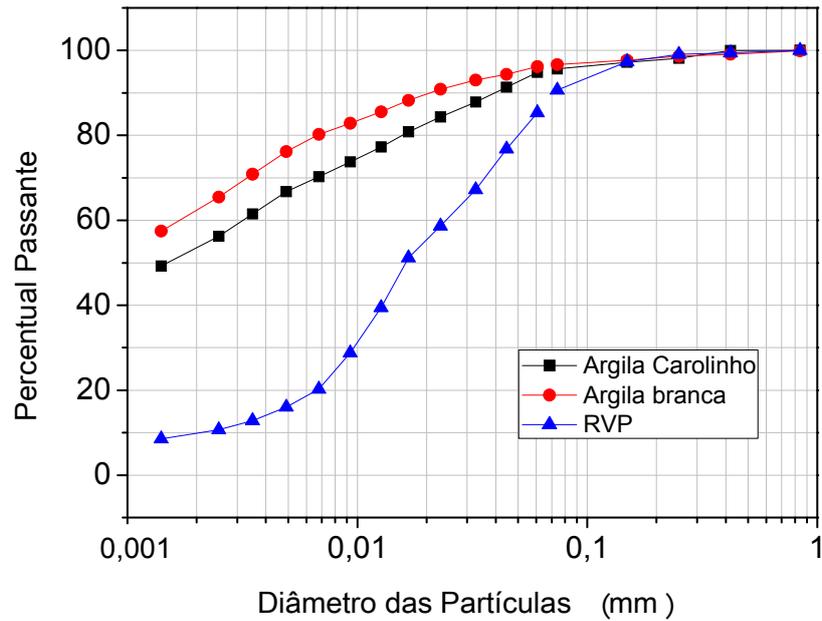


Figura 5.7 - Distribuição de tamanho de partícula das argilas carolinho e branca e do resíduo de vidro plano.

5.1.6. Análise Morfológica

5.1.6.1. Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens do pó de RVP obtidas por MEV são apresentadas na Figura 5.8. Observa-se que o material é constituído por partículas angulosas e irregulares. Nota-se que as partículas menores encontram-se aderidas as partículas maiores ou formando aglomerados. Este comportamento ocorre devido à maior energia de superfície de partículas menores, favorecendo mecanismos de aglomeração. O espectro de EDS (espectrometria de energia dispersiva de raios-X) identificou na amostra de RVP picos mais intensos dos elementos Si, O, Na, Ca e Mg, que estão de acordo com a análise química (Tabela 5.1).

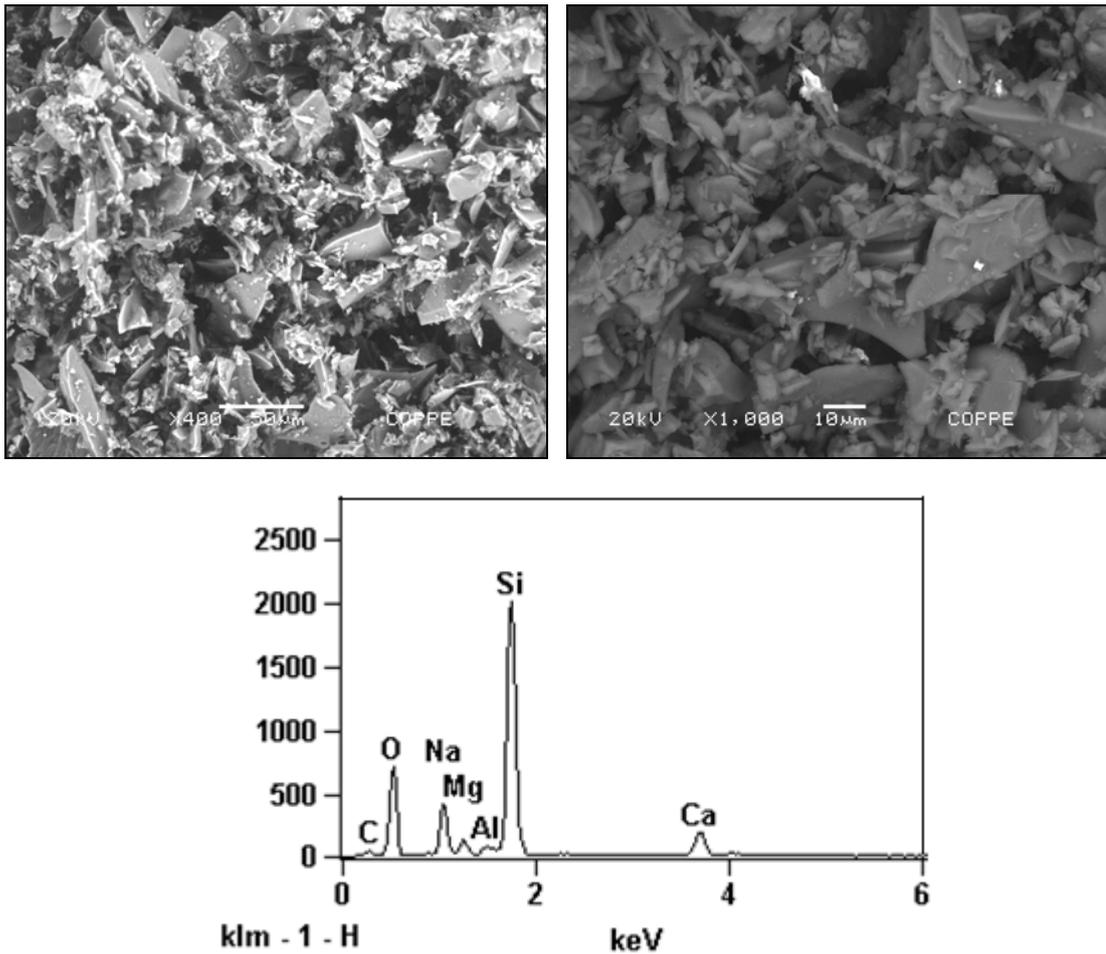


Figura 5.8 – MEV do resíduo de vidro plano com mapeamento de EDS. Aumento de 400x e 1000x.

5.1.6.2. Microscopia Óptica

A Figura 5.9 apresenta o pó do resíduo de vidro plano obtido por microscopia óptica. Nota-se que a limitação da técnica de MO dificulta a identificação das partículas do RVP. Entretanto, é possível notar a presença de partículas de quartzo, indicada pela seta preta.

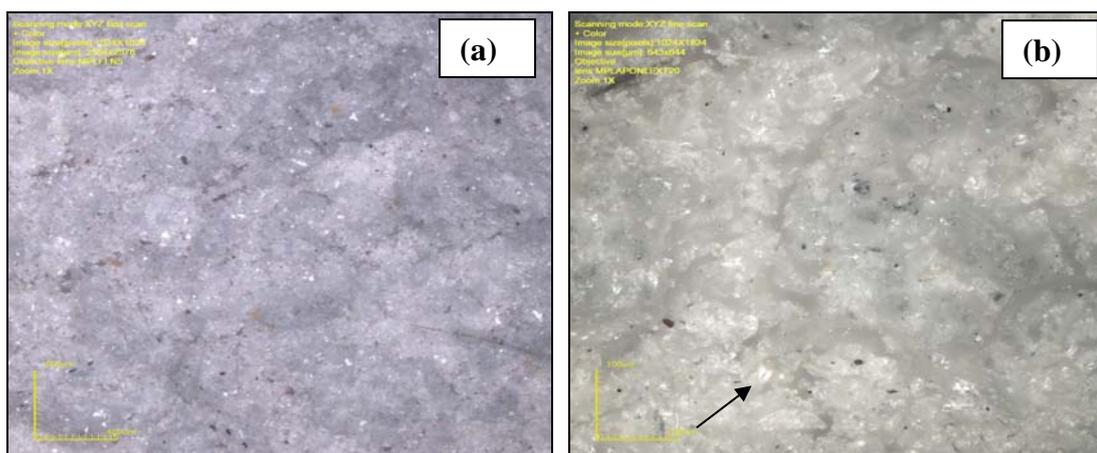


Figura 5.9 – MO do resíduo de vidro plano com aumento de (a) 108x e (b) 480x.

5.2. Caracterização das Massas Cerâmicas Incorporadas com RVP

5.2.1. Plasticidade

A Figura 5.10 indica a localização das massas cerâmicas determinadas através do limite de plasticidade de Atterberg. É possível obter através desta técnica um prognóstico da etapa de conformação por extrusão, ou seja, indicação das regiões de extrusão aceitável e ótima. Observa-se que as massas cerâmicas com 0, 10, 20 e 40% localizam-se fora da região de extrusão aceitável, com elevado limite de plasticidade (LP) que indica a quantidade de água necessária para o material alcançar a consistência plástica. Este comportamento ocorre provavelmente devido a elevada plasticidade das argilas utilizadas para a produção da massa cerâmica. A adição do resíduo como um material não plástico acarretou na diminuição da LP, porém somente a formulação com 30 % de RVP apresentou melhor trabalhabilidade, posicionando-se na região de extrusão aceitável. É possível observar na Figura 5.10 que a massa com incorporação de 40% de RVP apresentou baixo índice de plasticidade (IP), que esta associada com o intervalo de consistência plástica, sendo o IP ideal acima de 10% (Abajo, 2000). O gráfico indica ainda que incorporações superiores a 30% de RVP não são ideais para a obtenção de trabalhabilidade da massa cerâmica; maiores adições podem acarretar em defeitos nas peças, como a diminuição da resistência mecânica.

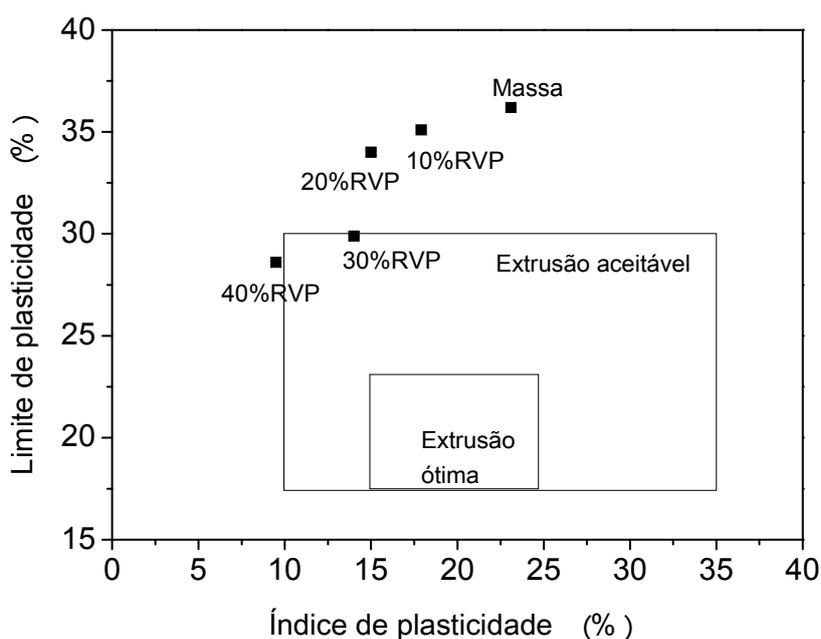


Figura 5.10 – Prognóstico de extrusão através dos limites de Atterberg com localização das massas cerâmicas.

5.2.2. Propriedades Físicas e Mecânicas

5.2.2.1. Densidade Aparente a Seco e Densidade Relativa

A densidade aparente a seco das peças é apresentada na Figura 5.11. Sabe-se que a fluidez da massa é uma característica imprescindível para a operação de prensagem dos corpos de prova. Entretanto, algumas características podem influenciar positiva ou negativamente na fluidez da massa, sendo elas, a distribuição granulométrica, a forma, a textura superficial dos grânulos e aderência entre os grânulos (ALBERO, 2000).

A partir deste contexto, podemos analisar os resultados da densidade aparente a seco (Figura 5.11). Segundo Vieira e Pinheiro (2011), a presença da areia na massa cerâmica, atua na plasticidade/trabalhabilidade da argila no sentido a reduzir a retração de secagem e queima, sendo normalmente o percentual da areia em cerâmica vermelha entre 15 a 30%. Entretanto, pode-se notar (Figura 5.7) que a argila branca que foi utilizada em 70% para a produção da massa argilosa apresentou um percentual de “fração areia” de 10,4%, podendo este ter sido um agravante para os baixos valores da densidade aparente a seco.

Como a areia tem seu tamanho de partícula maior que o da caulinita, esta contribui para um melhor empacotamento das partículas, entretanto, isto não ocorreu na densidade aparente a seco (Figura 5.11). É possível observar ainda a variação nos resultados da densidade a seco com a adição resíduo de vidro plano. Tal comportamento pode ter ocorrido devido a uma variação no teor de água utilizada para conformação dos corpos de prova. Contudo, pode-se notar que a melhor composição estudada foi a massa com 20% de RVP, acima desta o vidro atuou na diminuição da densidade aparente a seco.

Como a densidade real do RVP ($2,50 \text{ g/cm}^3$) é diferente da argila branca ($2,45 \text{ g/cm}^3$), o grau de empacotamento a seco das cerâmicas deve ser avaliado através da densidade relativa. Nota-se na Figura 5.12, que incorporações maiores de RVP na argila provocam porosidade na cerâmica, uma vez que a densidade relativa da massa depende do volume de poros intergranulares (espaços vazios entre os grânulos) e do volume de poros intragranulares (poros existentes no interior dos grânulos), ambos por unidade de volume do sólido. Isto ocorreu possivelmente devido à morfologia do RVP que se apresenta na forma de aglomerados irregulares conforme mostra a Figura 5.8.

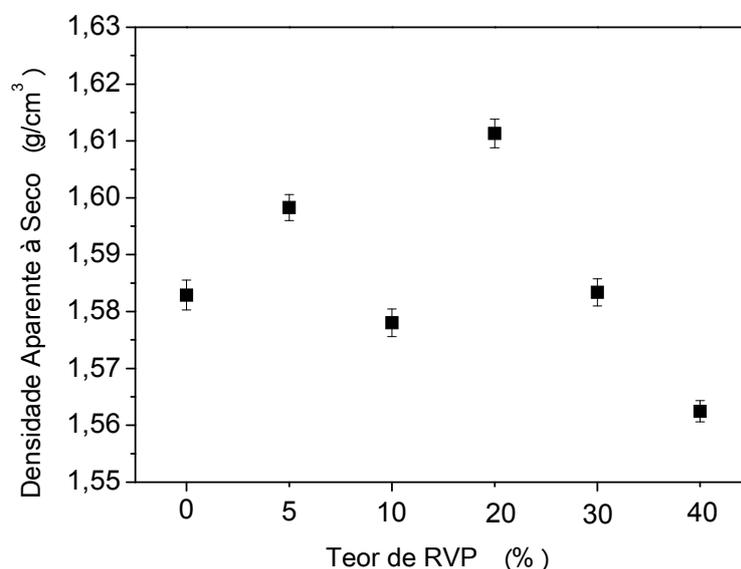


Figura 5.11 – Densidade Aparente à Seco das peças secas a 110°C em função do teor de RVP incorporado.

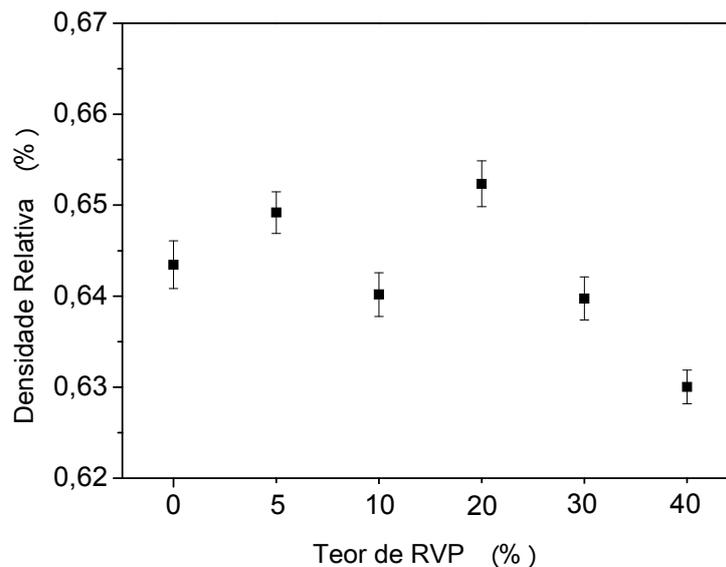


Figura 5.12 – Densidade Relativa das peças secas a 110°C em função do teor de RVP incorporado.

5.2.2.2. Absorção de Água

A Figura 5.13 apresenta a absorção de água das massas cerâmicas queimadas a 850, 950 e 1050°C, em função do teor de resíduo de vidro plano incorporado. Observa-se que com o aumento do teor de RVP e da temperatura de queima, os valores de absorção de água diminuem. Isto ocorre devido à ação fundente do resíduo, que forma fase líquida e conseqüentemente a densificação da peça. Pode-se associar a alta absorção de água aos valores da densidade relativa das peças (Figura 5.12), uma vez que a absorção de água está associada à porosidade aberta do material que é causada provavelmente devido à morfologia do RVP, além do menor grau de empacotamento a seco das amostras. Considera-se que o formato irregular das partículas de vidro tenha atuado de forma negativa na densificação das peças.

Nota-se que a incorporação de 20% de resíduo acarretou uma redução de 47,6% na absorção de água da massa argilosa queimada a 1050°C. Entretanto, para teores maiores de incorporação a variação nos valores de absorção de água não foi significativa, uma vez que é possível associar a queda da resistência mecânica (Figura 5.15).

Para tijolos, segundo a norma ABNT 15270-1 (2005) o índice de Absorção de água não deve ser inferior a 8% nem superior a 22%. Assim nota-se que as peças

com teor de RVP de 30 e 40% queimadas a 850°C, peças com teor de 20, 30 e 40% queimadas a 950°C e todas as peças queimadas a 1050°C se enquadram na norma.

A norma ABNT 15310 (2009) indica que o limite máximo admissível da absorção de água para telhas cerâmicas é de 20%. Isto significa que as peças cerâmicas com melhores resultados foram as com teores de RVP de 5, 10, 20, 30 e 40% queimadas a 1050°C, além das peças com 20,30 e 40% de RVP queimadas a 950°C, se enquadram dentro da norma.

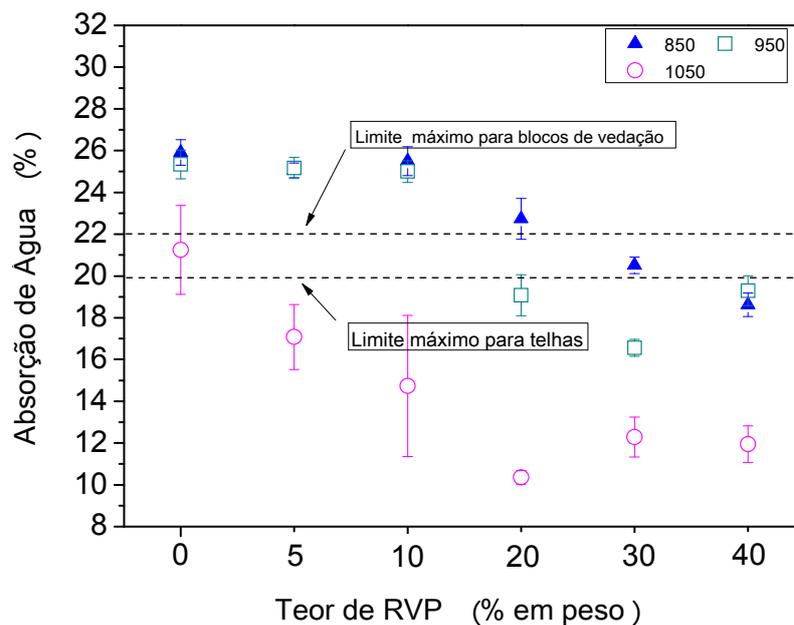


Figura 5.13 – Absorção de água em função do teor de RVP incorporado e da temperatura de queima.

5.2.2.3. Retração Linear de Queima

De acordo com Tallini Junior (2009), a retração linear é uma propriedade que depende fundamentalmente da densidade a seco da peça prensada, da composição da massa e das condições de queima.

A viscosidade da fase líquida é reduzida com o aumento da temperatura, facilitando com que os espaços vazios entre as partículas que ainda não se fundiram sejam preenchidos, resultando na diminuição do volume de poros e a conseqüente retração da peça.

A Figura 5.14 mostra o comportamento da retração linear das massas cerâmicas em função da temperatura de queima. Observa-se que nas amostras queimadas a 850°C ocorre um incremento não muito significativo neste parâmetro. A

partir de 950°C pode-se notar o brusco incremento da retração linear para amostras com até 20% de RVP adicionado. As amostras com 30 e 40% de RVP queimadas a 1050°C apresentam uma retração menor, provavelmente causada devido à granulometria mais grosseira do RVP, em comparação com a argila, o que dificulta o processo da sinterização. O maior valor de retração linear encontrado foi para a temperatura de 1050°C para a formulação com 20% de vidro chegando a aproximadamente 9,5%.

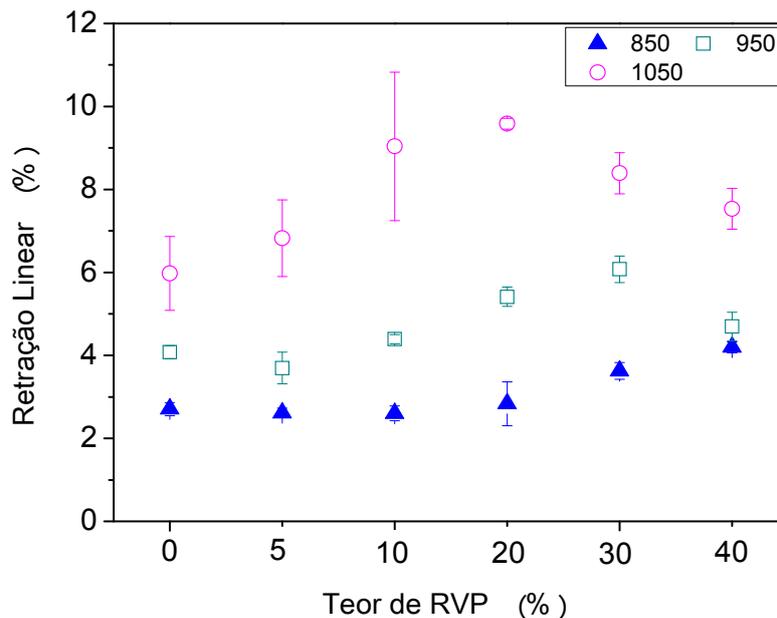


Figura 5.14 – Retração linear em função do teor de RVP incorporado e da temperatura de queima.

5.2.2.4. Tensão de Ruptura à Flexão

A resistência mecânica é uma propriedade fortemente dependente da temperatura de queima, em geral o aumento da temperatura de queima, aumenta a resistência; isto se deve à presença de uma estrutura mais densa, ou seja, menor porosidade (Zanotto e Migliore, 1991).

A Figura 5.15 apresenta a tensão de ruptura à flexão das cerâmicas em função do teor de RVP adicionado e temperatura de queima. É possível observar que a adição de RVP não ocasionou mudanças significativas de 0 a 10% nas peças queimadas nas temperaturas de 850 e 950 °C. À temperatura de 1050°C, nota-se que a adição do vidro influenciou no aumento da resistência mecânica, tal comportamento também ocasionado ao aumento da temperatura de queima. É possível notar ainda que o resíduo do vidro influenciou positivamente para as 3

temperaturas estudadas em adições de até 20%, acima desta quantidade a resistência mecânica diminui, o que pode acarretar defeitos nas peças devido à má formação da fase líquida.

A incorporação do resíduo atuou na melhora significativa da resistência mecânica da argila, possivelmente devido a uma combinação de fatores como, a redução da perda de massa durante a queima, a atuação das partículas de compostos de ferro como inibidores de propagação de trinca ou ao grau de empacotamento a seco (Vieira *et al.*, 2011).

Segundo, Vieira *et al.*, (2011), as peças cerâmicas queimadas a 850, 950 e 1050°C superaram a resistência mínima desejada para fabricação de peças como, tijolos de alvenaria, tijolos furado e telhas.

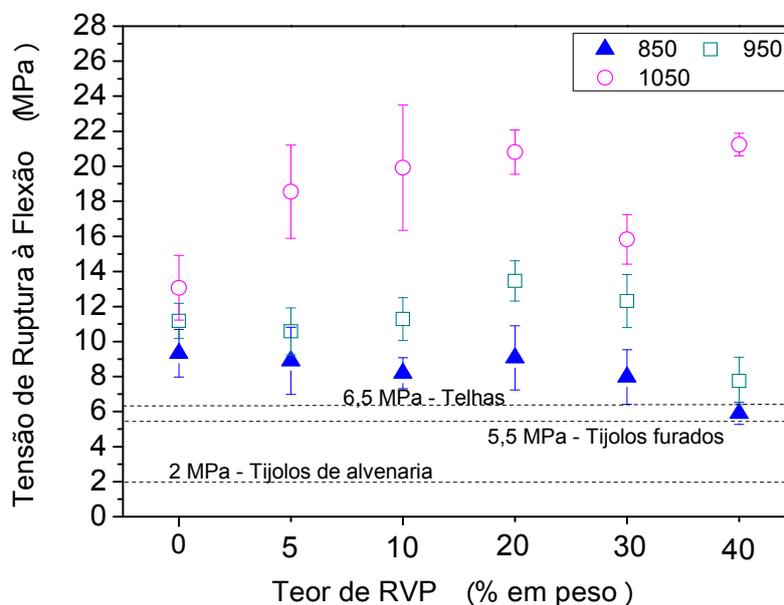


Figura 5.15 – Tensão de ruptura à flexão em função do teor de RVP incorporado e da temperatura de queima.

5.2.2.5. Módulo de Elasticidade

O ramo da construção civil exige materiais que não sofram grandes deformações quando sujeitos a solicitações mecânicas. Neste contexto vale ressaltar a importância do módulo de elasticidade que é uma propriedade mecânica que avalia a resistência do material à deformação elástica, ou seja, é a medida da rigidez do material.

O módulo de elasticidade de uma cerâmica vermelha varia em torno de 7×10^4 e 50×10^4 MPa (Callister, 2007). Segundo Zanotto e Migliore (1991), o módulo

elástico de um tijolo magnesita e um tijolo fire clay é dado por 20 e 10 GPa, respectivamente.

A Figura 5.16 apresenta os valores de módulo de elasticidade flexural das composições estudadas neste trabalho. Observa-se que para a massa pura não houve variação significativa nos valores do módulo, entretanto a adição do vidro ocasionou o aumento desta propriedade.

Nota-se ainda que o comportamento do módulo elástico é fortemente dependente da temperatura, uma vez que o aumento da temperatura de 850 para 1050°C ocorreu um aumento no módulo elástico de 4 para 14 GPa, provavelmente devido ao aumento do grau de sinterização das partículas da cerâmica (Pinheiro e Holanda, 2010). O comportamento de vitrificação das peças cerâmicas com o aumento da temperatura ocasionou a redução da porosidade e formação de novas fases cristalinas, resultando assim o aumento do módulo elástico. Segundo Pinheiro e Holanda (2010), a cerâmica vermelha é considerada um material multifásico, de modo que o módulo de elasticidade total corresponde a um valor intermediário dos valores de módulo das fases presentes na cerâmica.

Dados apresentados na literatura mostram que valores de módulo elástico para cerâmica vermelha pura (argila) podem variar de 0,4 a 1,7 GPa, (Pinheiro e Holanda, 2010).

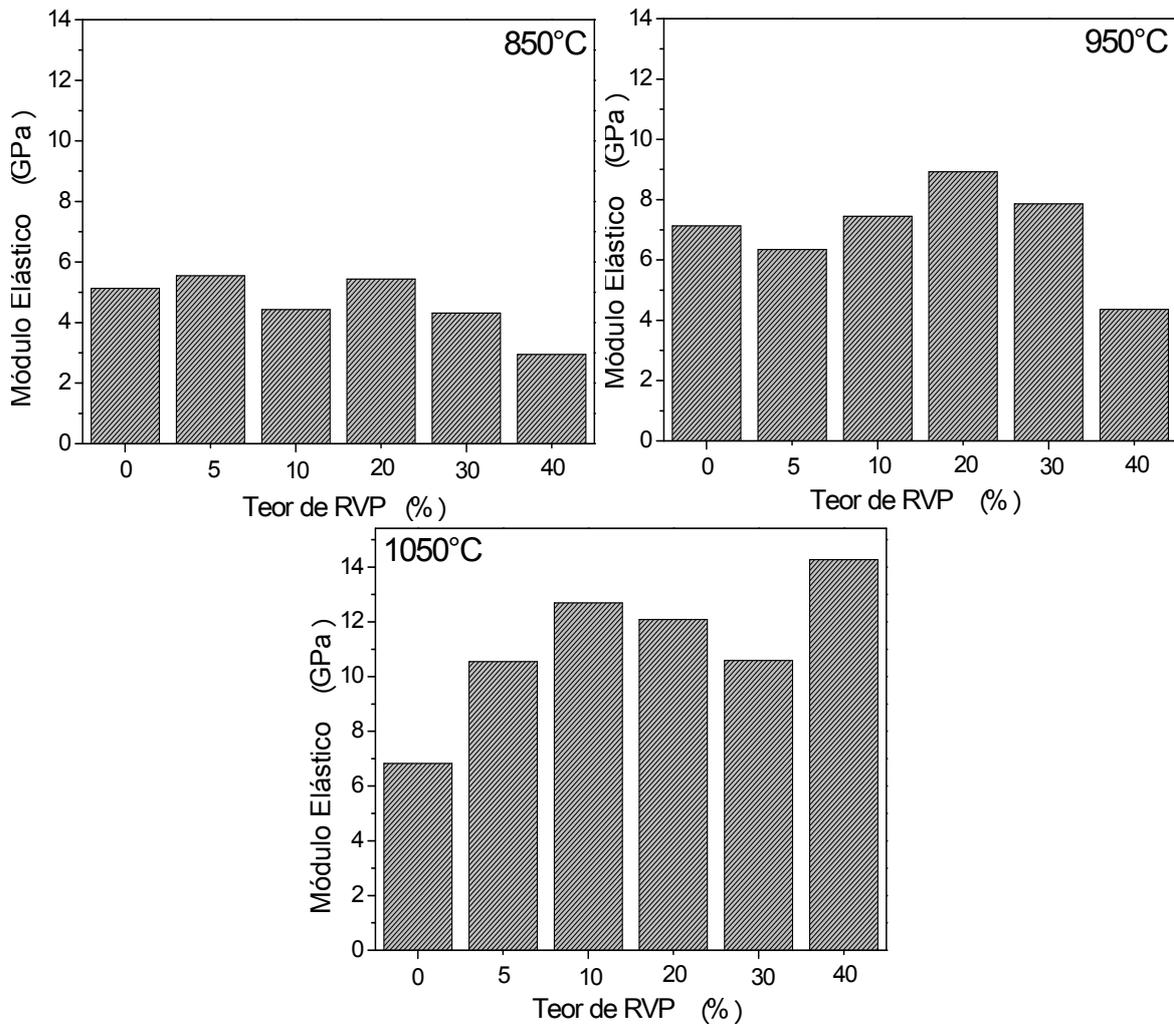


Figura 5.16 – Módulo Elástico Flexural em função do teor de RVP incorporado e da temperatura de queima.

5.2.3. Avaliação Microestrutural

5.2.3.1. Análise por Difração de raios-X

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam os picos de raios-x das amostras queimadas sem resíduo e com 40 % de RVP. Observa-se que a partir de 800°C a caulinita não é mais detectada devido à eliminação da água de constituição, transformando-se em metacaulinita (fase amorfa). Entretanto podem ser notadas fases cristalinas como quartzo, feldspato, mica muscovita e hematita. Segundo Vieira et al., (2005), os minerais mica e quartzo originam-se da argila natural, enquanto a hematita foi formada a partir da desidratação do hidróxido de ferro.

Já o feldspato pode ser uma fase formada durante a etapa de queima, uma vez que não foi identificada no difratograma das matérias-primas em seu estado natural, Figura 5.1 e 5.2. Esta fase aparece em temperaturas ao redor de 700°C,

provavelmente devido a reação de SiO_2 , Al_2O_3 e K_2O (Carty, 1998). Como pode-se notar na Figura 5.17 o feldspato aparece em torno de 850°C , o que comprova a afirmação acima. A diminuição na intensidade dos picos do mineral mica muscovita, ocorreu provavelmente devido a formação da fase líquida, e ainda a diminuição da intensidade nos picos do quartzo indicando que ocorreu sua dissolução na fase líquida formada.

Acima de 1000°C ocorre à formação do espinélio e mulita, originados da metacaulinita. Segundo Vieira e Monteiro (2003), a formação da mulita contribui de forma positiva ao material cerâmico, uma vez que lhe confere elevada resistência mecânica.

Observa-se ainda nas Figuras 5.17 e 5.18 que a adição do vidro plano não modificou as principais fases cristalinas.

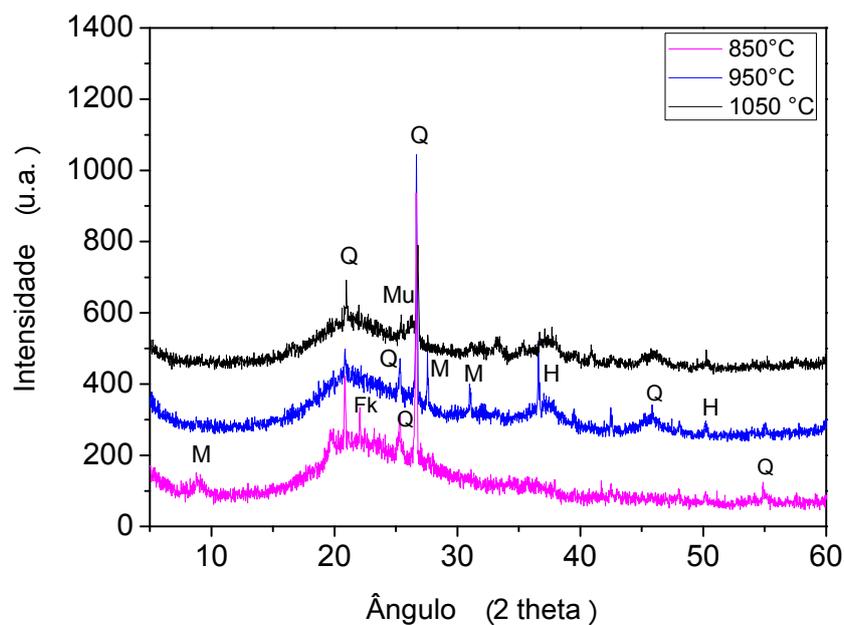


Figura 5.17 – Difratograma de raios-x das amostras queimadas sem adição de RPV. **Q** = Quartzo; **Fk** = Feldspato; **H** = Hematita; **M** = Mica; **Mu** = Mulita.

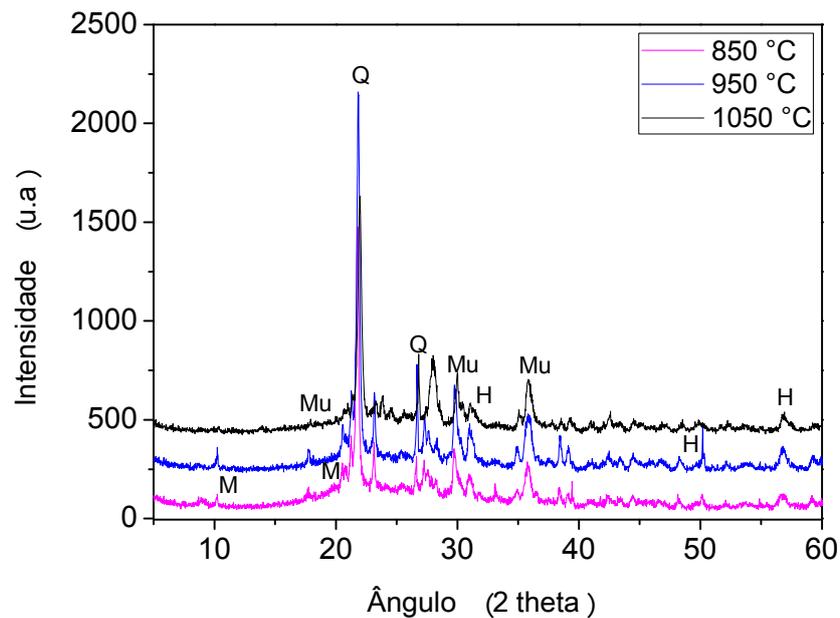


Figura 5.18 – Difratograma de raios-x das amostras queimadas com adição de 40% de RVP.

Q = Quartzo; **H** = Hematita; **M** = Mica; **Mu** = Mulita.

5.2.3.2. Microscopia Ótica

A análise microestrutural por microscopia ótica tem por objetivo observar as diferentes fases, sua forma e como estão distribuídas nos corpos de prova queimados em diferentes temperaturas e composições. As Figuras de 5.19 a 5.21 apresentam as micrografias das cerâmicas queimadas com 0, 10, 20 e 40% de RVP (a, b, c e d, respectivamente) em temperaturas de 850, 950 e 1050°C.

Nota-se que a presença dos compostos de ferro, conforme indicado na composição química das argilas são os responsáveis pela cor avermelhada das cerâmicas. Grãos de quartzo são identificados através dos círculos pretos, enquanto as setas pretas evidenciam partículas do resíduo de vidro que não fundiu. É possível observar também a presença de partículas mais escuras (setas brancas) que podem estar associadas aos feldspatos ou hematita. Em temperatura mais alta, 1050°C (Figura 5.21), nota-se a presença de trincas ao redor das partículas. Isto prova que o aumento da temperatura causa diferentes coeficientes de dilatação térmica das fases presentes, além de mostrar uma matriz mais densa.

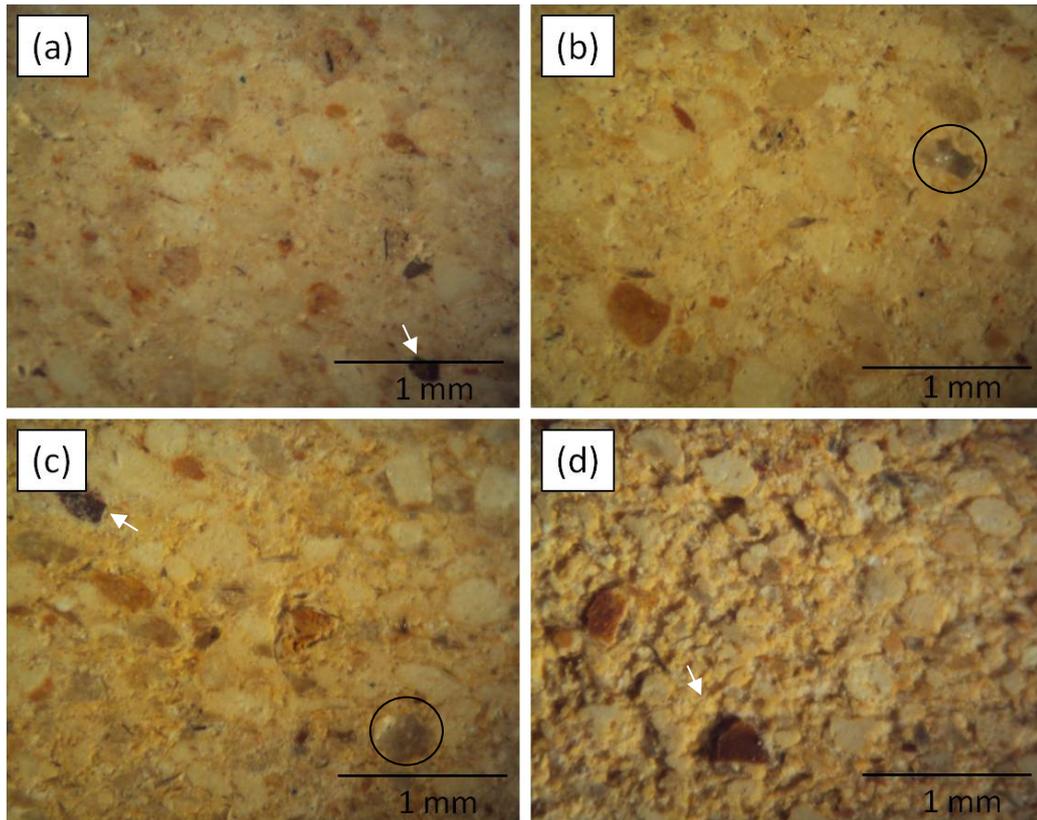


Figura 5.19 – Microscopia ótica das peças com 0,10, 20 e 40% de RVP queimadas a 850°C.

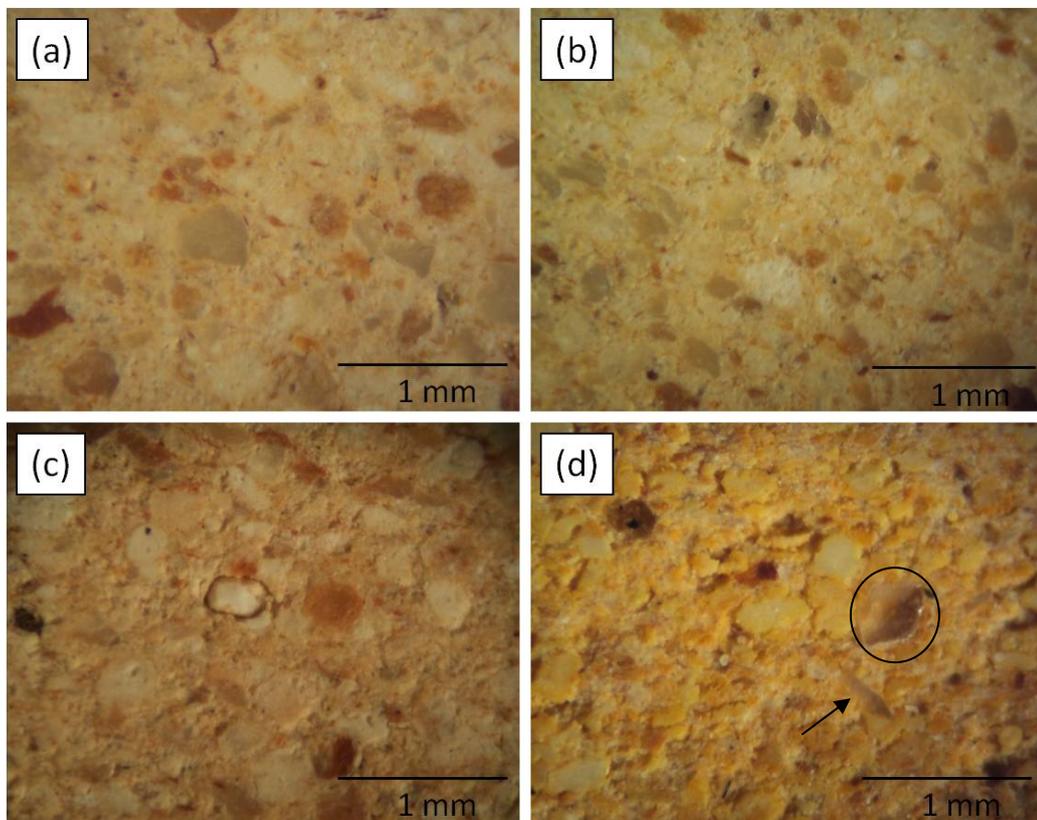


Figura 5.20 – Microscopia ótica das peças com 0,10, 20 e 40% de RVP queimadas a 950°C.

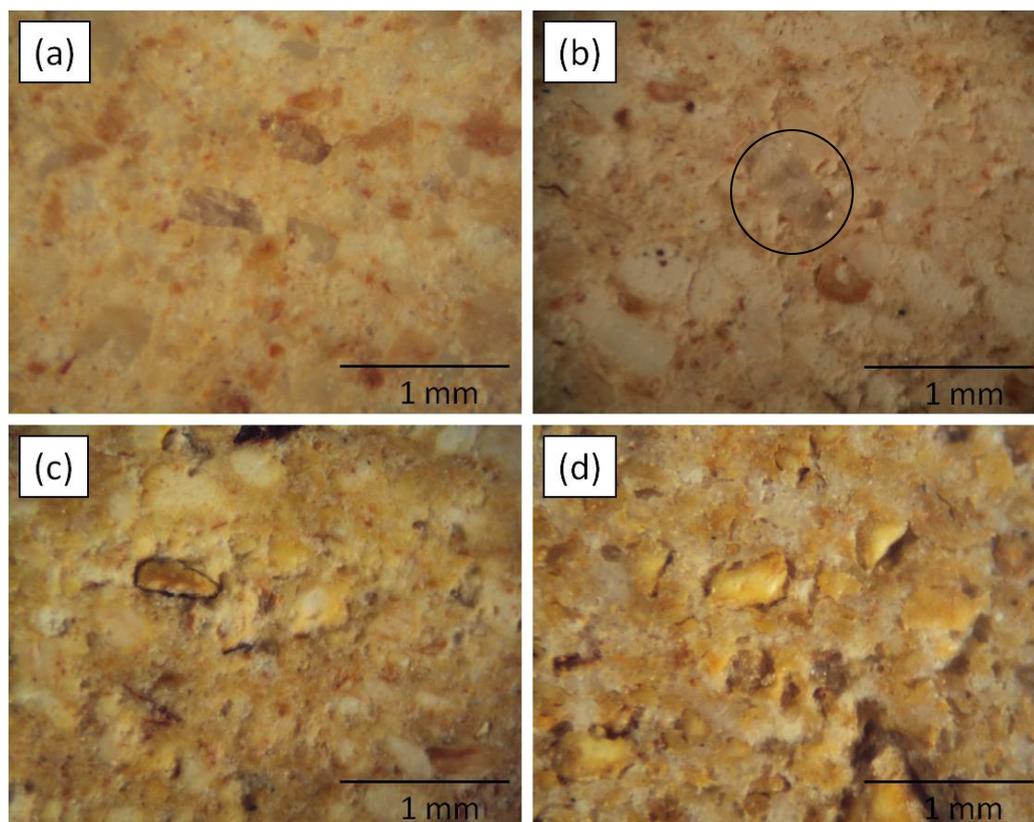


Figura 5.21 – Microscopia óptica das peças com 0,10, 20 e 40% de RVP queimadas a 1050°C.

5.2.3.3. Microscopia Eletrônica de Varredura

Através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível observar a microestrutura dos materiais obtidos após a queima.

As Figuras de 5.22 a 5.24 apresentam as micrografias obtidas por microscopia óptica para as amostras com 0, 10, 20 e 40% de RVP (a, b, c e d, respectivamente) queimadas nas temperaturas de 850, 950 e 1050°C. Nestas Figuras fica evidente que à medida que se adiciona resíduo tende a ocorrer o aumento gradual da fase vítrea e da porosidade, logo apresentam uma textura rugosa e microestrutura porosa.

É possível observar que a 850 e 950°C a microestrutura da massa cerâmica pura apresenta uma superfície lisa com presença de grãos de quartzo evidentes. A adição do resíduo proporcionou uma textura grosseira, uma vez que as partículas de vidro são angulosas e irregulares, tendendo a aglomerarem. Nestas temperaturas não há formação suficiente de fase líquida para propiciar uma sinterização eficiente com alisamento da superfície.

A 1050 °C, Figura 5.24 observa-se que a massa pura apresenta uma microestrutura com grãos de quartzo separados da matriz. O quartzo possibilita o aparecimento tanto de trincas ao seu redor quanto de poros de elevado tamanho proveniente do seu arrancamento da cerâmica (Vieira et. al, 2010). Nesta mesma temperatura (Figura 5.30) nota-se que a cerâmica com 40% de RVP apresenta uma textura mais fina com microestrutura densa e presença de poros isolados, provavelmente devido ao caráter refratário das argilas de Campos dos Goytacazes. É possível notar que a presença do resíduo favorece uma maior sinterização da massa, provavelmente devido à presença de elementos fundentes presentes no resíduo. Além disso, observa-se que com a adição do resíduo e o aumento da temperatura, a porosidade fica bem evidente.

Esta porosidade em temperaturas mais altas pode ser resultante da etapa de compactação e gerada no próprio processo de queima, seja pela perda de massa, seja como consequência dos diferentes coeficientes de dilatação térmica das fases presentes na cerâmica. Este comportamento também pode ser explicado pelo fenômeno denominado de porosidade por overfiring, que ocorre quando um material é queimado a uma temperatura acima da necessária para produzir uma fase líquida. O resultado deste fenômeno é o surgimento de deformações, bolhas ou poros (Bragança e Bergman, 2002; Cavalcanti, 2010).

Segundo Sánchez-Muñoz *et al.*, (2002), existe uma região compreendida entre a temperatura ótima de queima e a temperatura onde a peça perde estabilidade dimensional, onde são formados os poros fechados que contêm gases, provenientes da decomposição das inclusões ricas em elementos voláteis procedentes dos feldspatos. Com o aquecimento, os gases presos nos poros tendem a expandir-se, resultando em uma força contrária à retração por densificação, gerando então a porosidade observada nas peças da Figura 5.24.

Com base nestes estudos da literatura, pode afirmar que o aumento da porosidade nas massas, com o aumento da temperatura e adição do RVP, pode ser explicado pela presença do percentual de vidro, que amolece em temperaturas em torno de 850°C, infiltrando-se nos poros da estrutura, e aprisionado assim os gases oriundos da decomposição dos óxidos fundentes (Godinho, 2004).

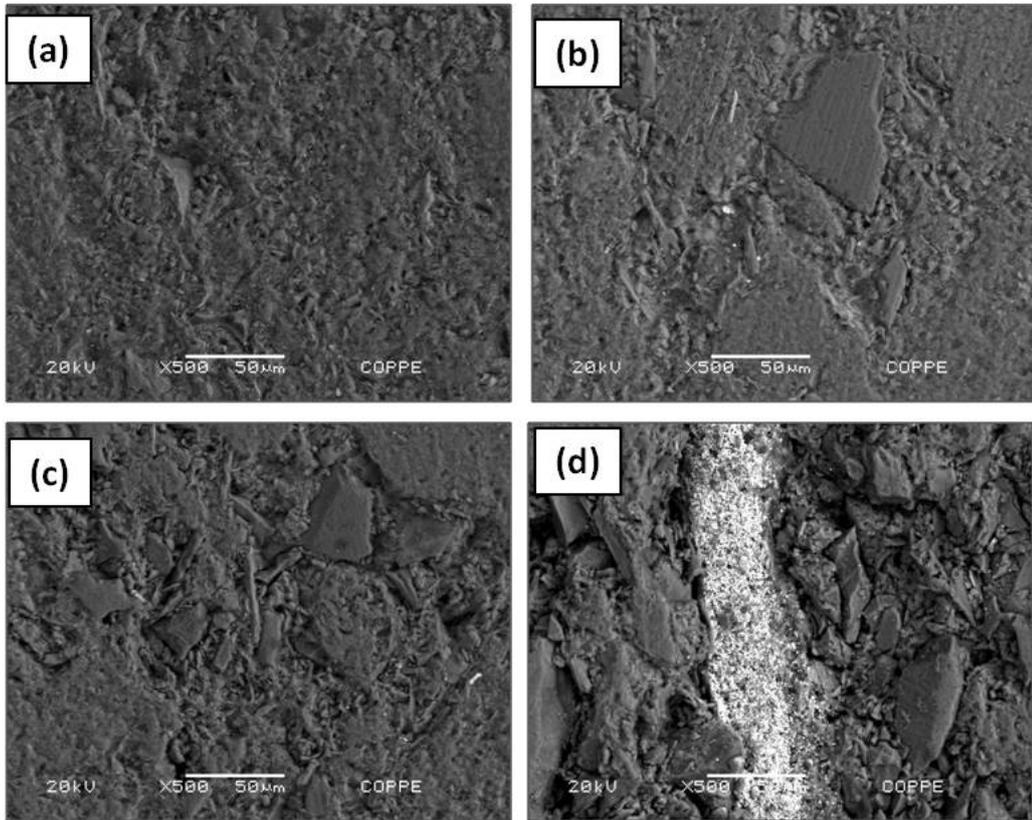


Figura 5.22 – Micrografias obtidas por MEV com 0,10, 20 e 40% de RVP com aumento de 500x, queimadas a 850°C.

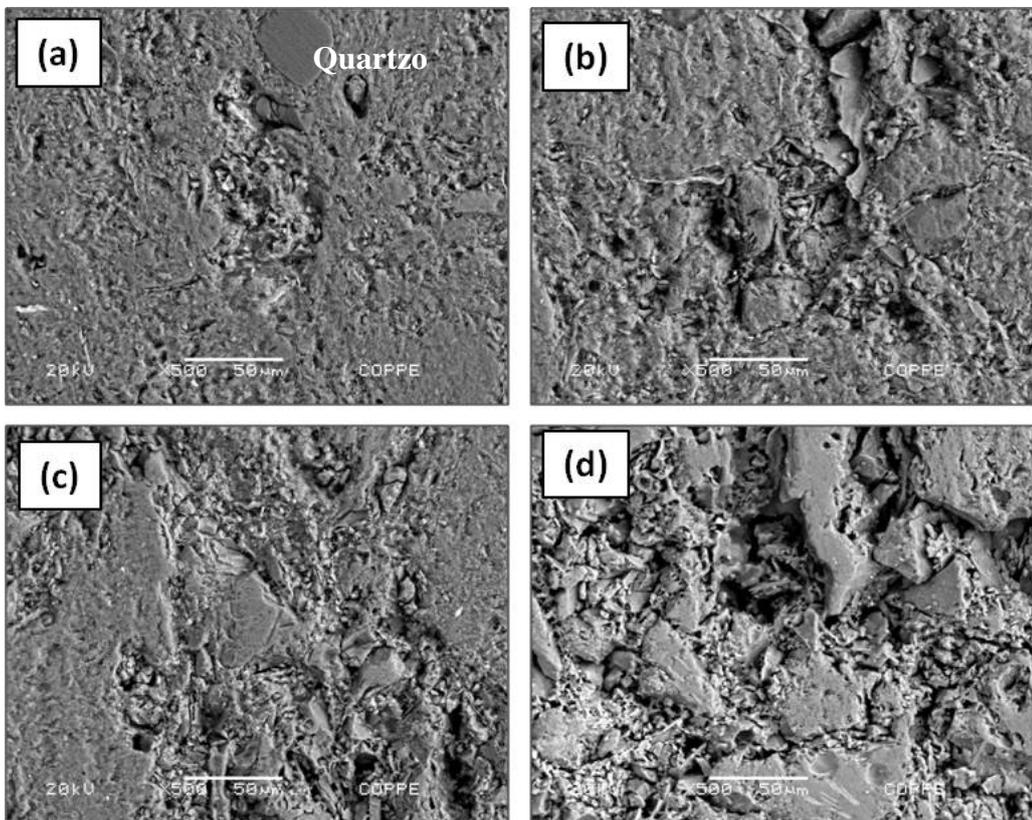


Figura 5.23 – Micrografias obtidas por MEV com 0,10, 20 e 40% de RVP com aumento de 500x, queimadas a 950°C.

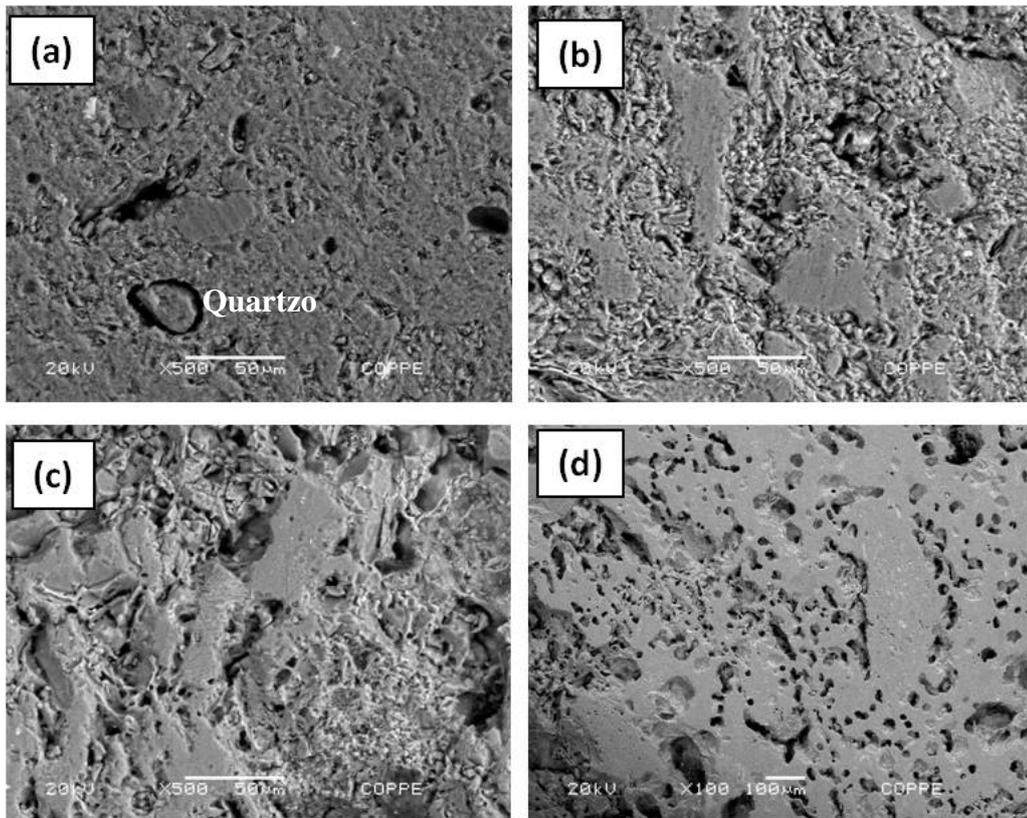


Figura 5.24 – Micrografias obtidas por MEV com 0,10, 20 e 40% de RVP com aumento de 500x, queimadas a 1050°C.

As Figuras de 5.25 a 5.30 apresentam as micrografias feitas por MEV com mapeamento EDS, destacando partículas indicadas pela letra X.

Observa-se que na temperatura de 850°C a massa cerâmica pura (Figura 5.25) apresenta uma superfície mais rugosa e com presença de porosidade aberta na estrutura do material, quando comparada com a massa cerâmica pura queimada a 950°C (Figura 5.27). Este comportamento se deve ao baixo grau de sinterização da massa argilosa, comportamento comum nas argilas de Campos do Goytacazes. A 1050°C (Figura 5.29) já pode-se notar a presença da fase líquida. Nota-se que massa argilosa pura (Figuras 5.25, 5.27 e 5.29) apresenta partículas ricas, principalmente em silício, alumínio, titânio e sódio, provavelmente grãos de quartzo.

As Figuras 5.26, 5.28 e 5.30 apresentam o MEV com mapeamento EDS das massas com 40% de RVP. O EDS mostra picos de Si, Al, Na, Ca, Mg, Fe, Ti e K, nota-se que a presença destes elementos pode ser proveniente do resíduo de vidro. Observa-se que as composições incorporadas com o resíduo e queimadas a 850 e 950°C (Figuras 5.26 e 5.28) apresentaram uma superfície mais rugosa e não

homogênea. Entretanto, em temperatura mais alta a 1050°C a presença da fase líquida é notória.

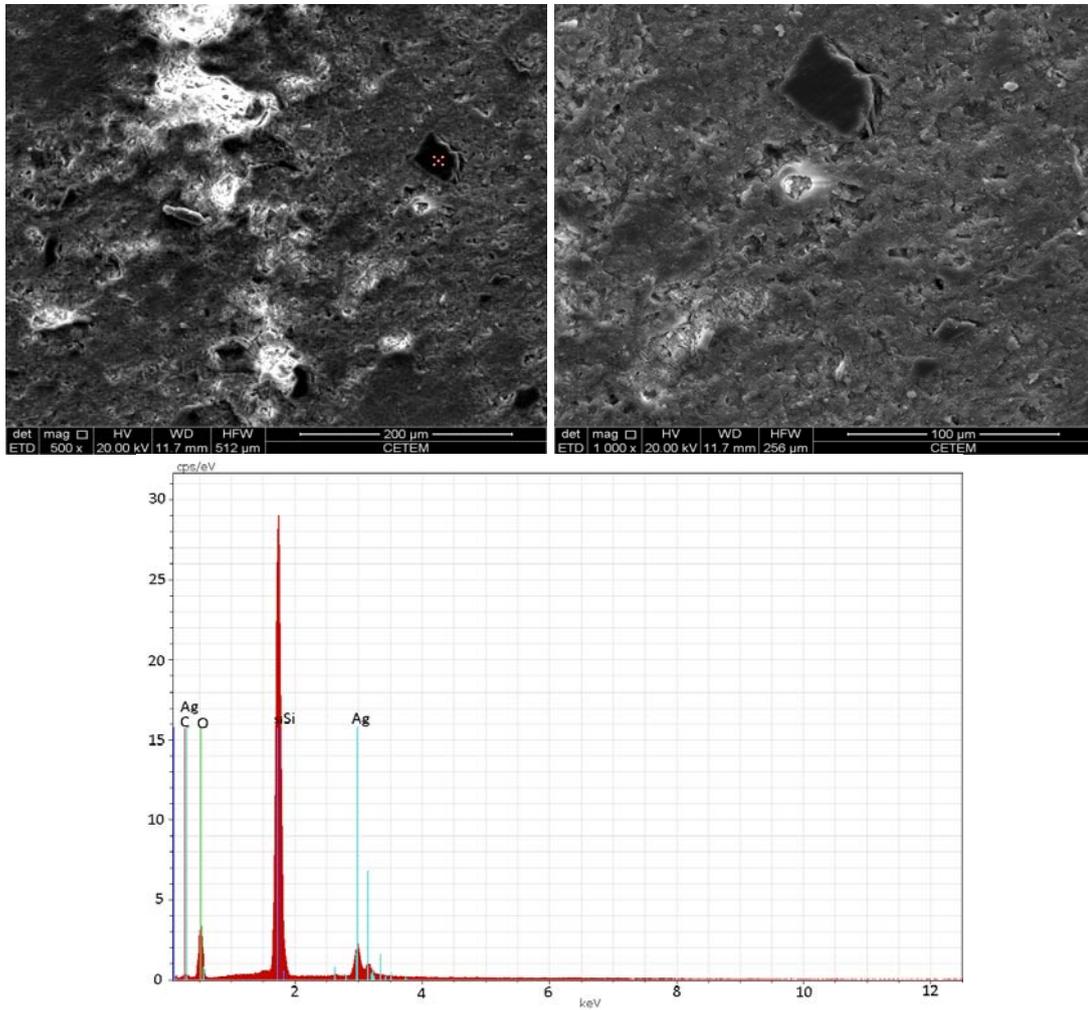
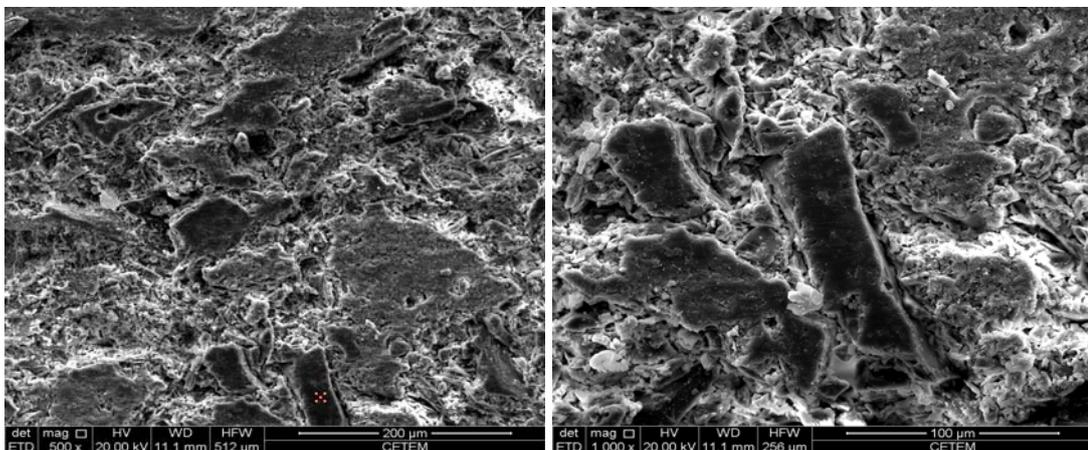


Figura 5.25 – Micrografias obtidas por MEV da massa argilosa pura com mapeamento EDS e aumento de 500 e 1000x, queimadas a 850°C.



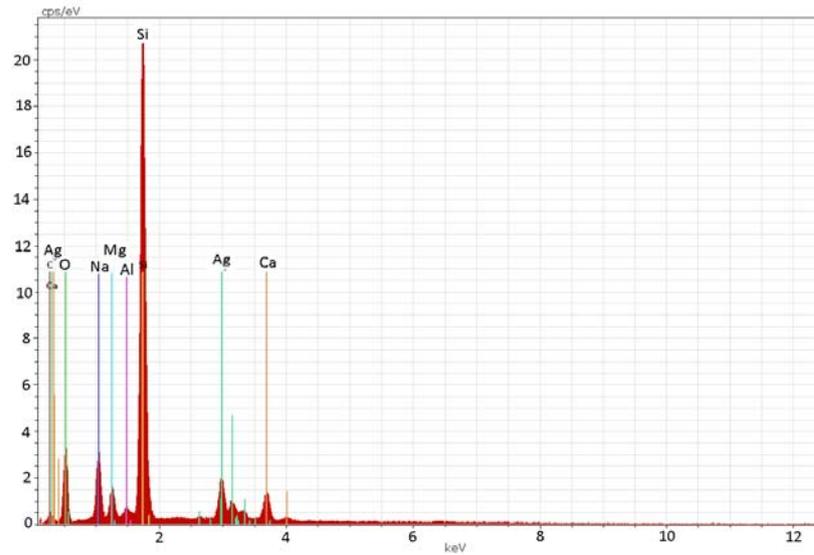


Figura 5.26 – Micrografias obtidas por MEV com 40% de RVP com mapeamento EDS e aumento de 500 e 1000x, queimadas a 850°C.

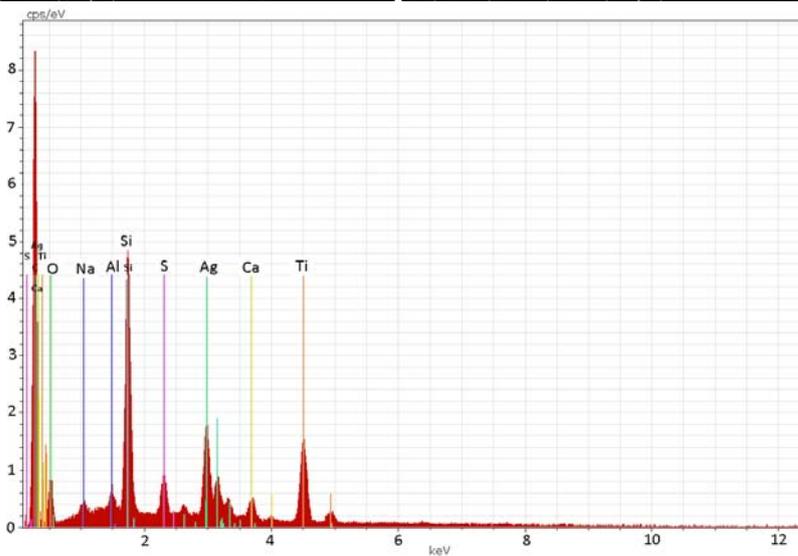
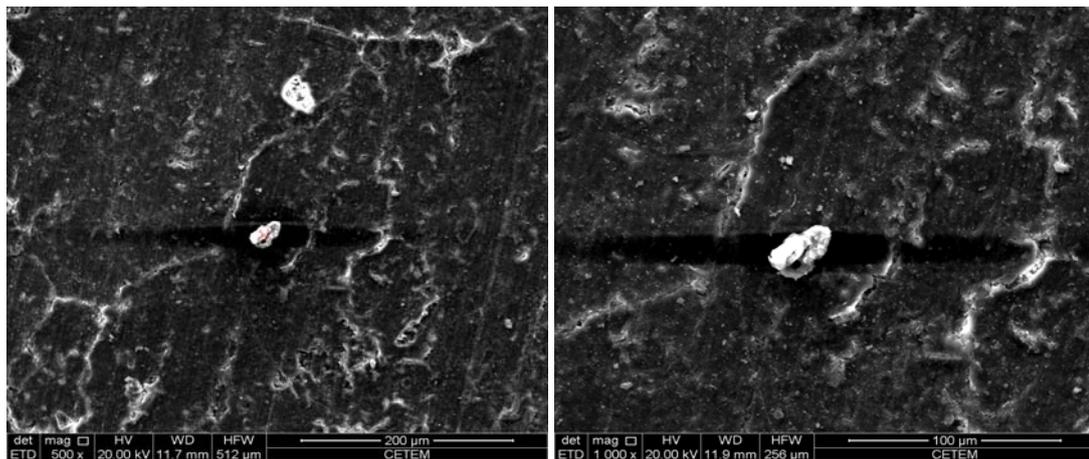


Figura 5.27 – Micrografias obtidas por MEV da massa argilosa pura com mapeamento EDS e aumento de 500 e 1000x, queimadas a 950°C.

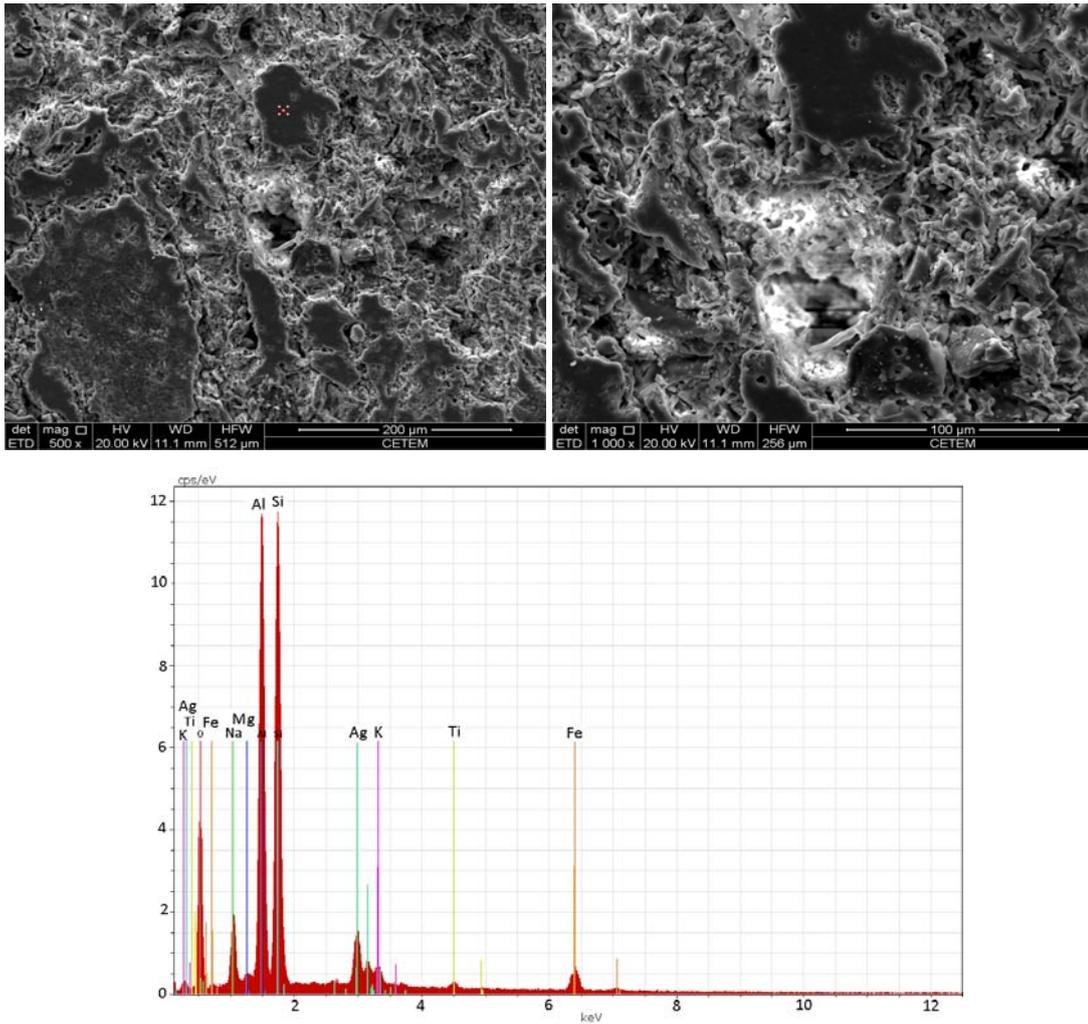
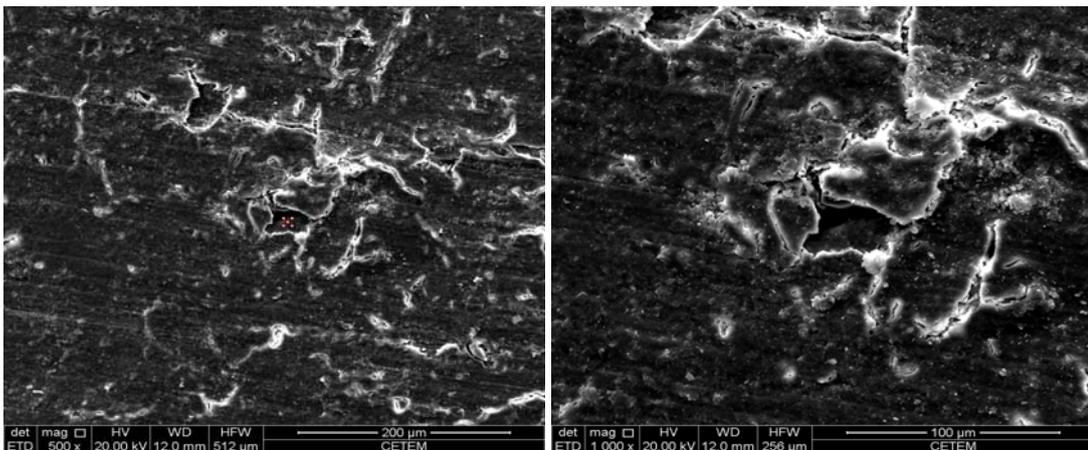


Figura 5.28 – Micrografias obtidas por MEV com 40% de RVP com mapeamento EDS e aumento de 500 e 1000x, queimadas a 950°C.



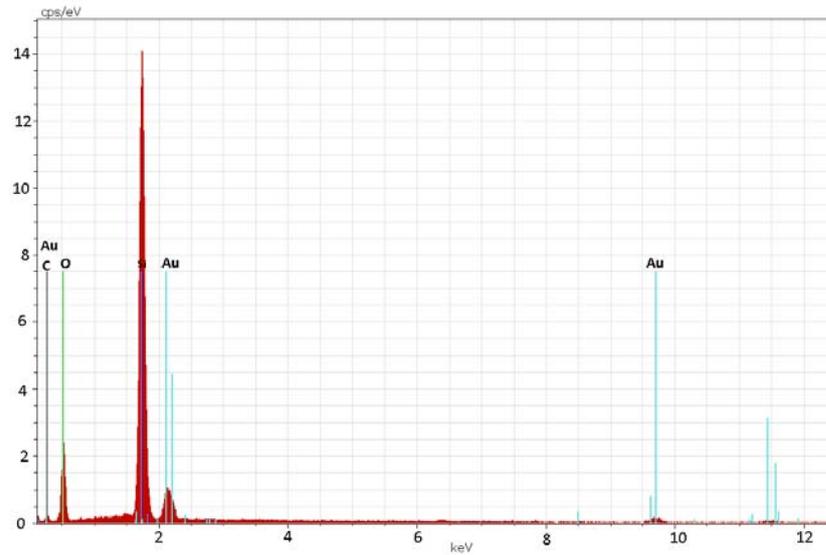


Figura 5.29 – Micrografias obtidas por MEV da massa argilosa pura com mapeamento EDS e aumento de 500 e 1000x, queimadas a 1050°C.

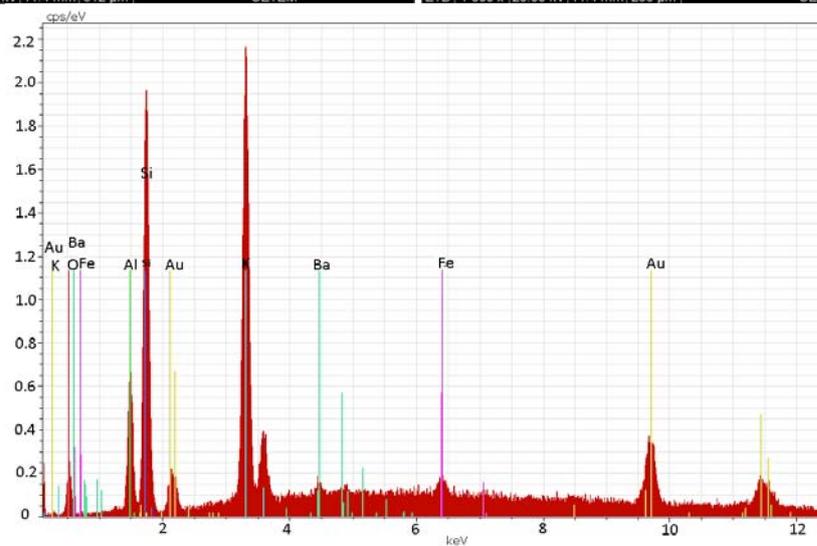
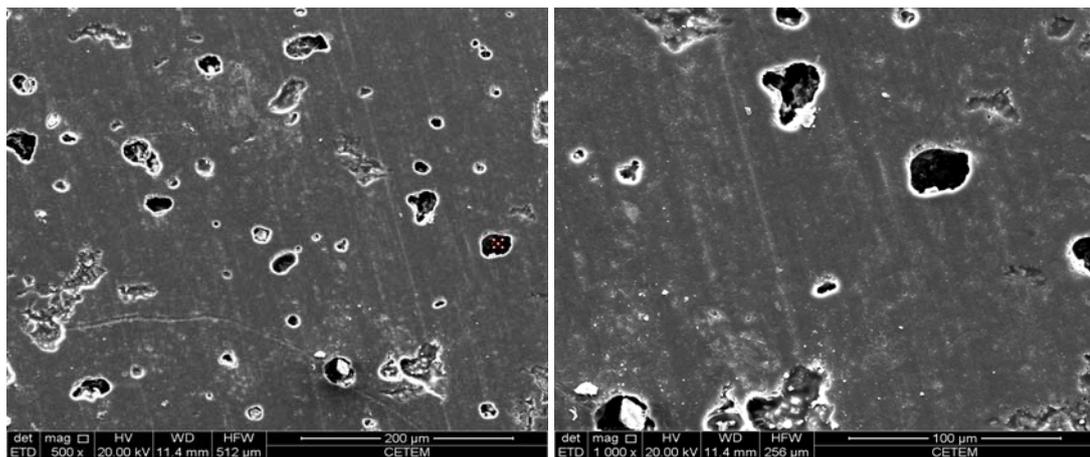


Figura 5.30 – Micrografias obtidas por MEV com 40% de RVP com mapeamento EDS e aumento de 100 e 500x, queimadas a 1050°C.

6. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos neste trabalho possibilita destacar as seguintes conclusões.

- Os ensaios de caracterização indicaram que o resíduo de vidro plano é constituído predominantemente de sílica (SiO_2), seguido pelos óxidos de sódio (Na_2O) e cálcio (CaO). Estes óxidos fundentes atuam no processo de sinterização, diminuindo a temperatura de queima das cerâmicas.
- A faixa de trabalho do resíduo de vidro plano está entre as temperaturas de 810 a 1078°C, por isso a escolha das temperaturas estudadas neste trabalho de 850, 950 e 1050°C. Temperaturas abaixo de 810 °C o vidro não preencheria a porosidade por fluxo viscoso. Vale ainda ressaltar que a temperatura de fusão para o RVP é de 1115°C, por isso não estudar a utilização deste resíduo em temperaturas mais elevadas.
- A massa cerâmica apresenta excessiva plasticidade, fato que acarreta uma maior quantidade de água para sua conformação. A incorporação do RVP como um resíduo não plástico, atuou na trabalhabilidade/plasticidade da massa argilosa.
- A baixa densidade a seco atuou negativamente nos valores de absorção de água que variaram de 26 a 10%. Provavelmente o elevado valor de absorção de água foi ocasionado devido ao baixo empacotamento a seco das cerâmicas. Entretanto, observa-se que a adição do RVP atuou na diminuição da absorção de água, trazendo como melhores resultados as formulações queimadas a 1050°C. Dando destaque a incorporação com 20% de RVP.
- A incorporação do resíduo em até 20% de RVP na massa cerâmica atuou no aumento significativo da resistência mecânica, embora, todas as formulações tenham alcançado a resistência mínima desejada para fabricação de peças como, tijolos de alvenaria, tijolos furado e telhas.
- O resíduo adicionado até 30% não alterou significativamente a retração linear da argila durante a etapa de queima nas temperaturas de 850 e 950°C. Com 20% de resíduo, entretanto, ocorreu redução desta propriedade das peças sinterizadas a 1050°C.

- Finalmente, os resultados indicaram que este tipo de resíduo tem potencial para o uso em cerâmica vermelha, devido ao seu caráter inerte e seu poder como material fundente.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir de resultados obtidos neste trabalho, são apresentadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros.

- Avaliar a viabilidade socioeconômica da incorporação de vidro plano em massas cerâmicas.
- Investigação das propriedades tecnológicas dos corpos cerâmicos a partir da adição de vidro plano em outras granulometrias.
- Realizar teste industrial variando a quantidade de vidro plano na massa argilosa.
- Aumentar a quantidade de corpos de prova para uma estatística mais apurada.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAJO, M. F. (2000). Manual Sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos. Ed. BELRALMAR S.A. Espanha. 360p.

ABIVIDROS – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br/index.php/28>>. Acesso em: 28 de Março de 2011.

ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos. Disponível em: <http://www.andiv.com.br/vidro_comum.asp>. Acesso em: 12 de Abril de 2011.

ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (2011). Disponível em: <http://www.andiv.com.br/fiquepordentro_vbrasilhoje.asp>. Acesso em: 06 de Abril de 2011.

ABC - Associação Brasileira de Cerâmica. Informações técnicas. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/asp/abc_59.asp>. Acesso em: 30 de Março de 2011.

ABC - Associação Brasileira de Cerâmica. Informações técnicas. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/asp/abc_51.asp>>. Acesso em: 28 de Março de 2011.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). Resíduos Sólidos: Classificação. NBR 10.004, 2ª Ed.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Determinação da análise granulométrica dos solos, NBR-7181-84, 1984.

ABNT NBR 15310:2005/Em.1:2009. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Componentes cerâmicos — Telhas — Terminologia, requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR 15270-1:2005. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT NBR 6508/1984. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

AKERMAN, M.. (2000). Natureza Estrutura e Propriedades do Vidro, CETEV (Centro Técnico de Elaboração do Vidro).

ALBERO, J. L. A. (2000). A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial Parte I: O Preenchimento das Cavidades do Molde. *Cerâmica Industrial*, 5 (5) Setembro/Outubro.

ALVES, O.L.; GIMENEZ, I.F. E MAZALI, I.O. Vidros. Em: De PAOLI, M.A. e MALDANER, O.A. (Eds.) *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola (Novos Materiais)*, n. 2, p. 13-24, 2001 (disponível no endereço: http://sbqensino.foco.fae.ufmg.br/caderno_novos_materiais).

AMBIENTEBRASIL (2011). Coleta e disposição final do lixo. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/coleta_e_disposicao_do_lixo/lixao_-_residuos.html>. Acesso 05 de Maio de 2011.

AMBIENTEBRASIL. Coleta e Disposição do Lixo. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/residuos/classificacao,_origem_e_caracteristicas.html>. Acesso em: 03 de Abril de 2011.

ASTM C373-72 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Test method for water absorption, bulk density, apparent porosity and apparent specific gravity of fired whiteware products. 1977a.

BITENCOURT, E. R. Utilização de matéria-prima alternativa na fabricação de tijolos de argila vermelha e branca. Dissertação de Mestrado, UFSC, 2004.

BRAGANÇA S.R.; BERGMANN C. P. (2004). Utilização de pó de vidro em uma massa industrial de cerâmica branca. Anais do XVI CBECIMat. Porto Alegre-RS.

BROWN, M. E.; GALLAGER, P. K. (2003). Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry -Applications to Inorganic and Miscellaneous Materials. Vol. 2.

CALLISTER, W. D. J. (1999). Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª Ed., Rio de Janeiro, LTC.

CALLISTER, W. D. Jr. (2007). Materials science and engineering: An introduction. Seventh Edition, United States of America, John Wiley & Sons.

CARTY, W. M., SENAPATI, U. (1998). Porcelain-Raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 81, pp. 1-18.

CATAPRETA, A. A. C., LANGE, L. C., MURTHA, N.A. (1999). Sistema de tratamento e destinação final de resíduos industriais gerados na indústria de produção de insulina. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, AIDIS. Desafios para o saneamento ambiental do terceiro milênio. Rio de Janeiro, ABES, 1-8p.

CAVALCANTI, M. S. L. (2010). Desenvolvimento de massas para grés sanitários utilizando resíduo de vidro plano como fundente em substituição parcial ao feldspato. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba. 158p.

CEBRACE – Empresa Cebrace Cristal Pano. São Paulo, 1974. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br>> Acesso em: 25 de Abril de 2011.

CEBRACE – Composição química. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/v2/vidro/composicao-quimica>>. Acesso em: 05 de Abril de 2011.

CONAMA – Conselho Nacional do Ambiente – Ministério do Meio Ambiente
Resolução nº307, de 05 de Julho de 2002. Estabelecem diretrizes, critérios,
procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil. Brasília, 2002.

DELBIANCO FILHO, S. Caracterização de vidros preparados com resíduo de
indústria de galvanostegia. 2003. 90 p. Dissertação (Mestrado Física) - Universidade
Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 2003.

DIAS, E. C. M. (2007). Gerenciamento de resíduos na construção civil. Trabalho de
Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – São Paulo – SP. Universidade Anhembí
Morumbi.

DONDI, M., GUARINI, G., RAIMONDO, M., ZANELLI, C. (2009). Recycling PC and TV
waste glass in clay bricks and roof tiles. *Waste Management*, v.29, p.1945–1951.

FARIA, K. C. P.; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. (2012). Influência da adição de
resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades tecnológicas de
cerâmica vermelha. SIMPÓSIO MATÉRIA, RIO DE JANEIRO, RJ.

FILHO, L. A. B.; FERREIRA, M. G. (1995). Coleta seletiva e reciclagem: A
experiência de Curitiba – Lixo que não é lixo. In: Seminário Internacional sobre
coleta seletiva e reciclagem de resíduos sólidos urbanos. Associação Brasileira de
Engenharia Sanitária e Ambiental – Seção Paraná.

GARDOLINSKI, J. E. C. F., WYPYCH, F. (2001). *Química Nova*, p. 761-767.

GODINHO, K. O. Incorporação de resíduos de vidro em cerâmica vermelha.
Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Campos dos Goytacazes-RJ.
2004a.

GODINHO, K. O.; RABELO, T. R.; HOLANDA, J. N. F.; SILVA A. G. P. Incorporação
de resíduo de vidro em cerâmica vermelha. Anais do 48º Congresso Brasileiro de
Cerâmica (CBC). Curitiba, PR, 2004b.

GODINHO, K.O.; HOLANDA, J.N.F.; SILVA A.G.P. Obtenção e avaliação de propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos à base de argila e vidros reciclados. *Cerâmica*, v. 51, p.419-427, 2005.

GOMES, C. B., Técnicas analíticas instrumentais aplicadas a geologia – Microsonda eletrônica: princípios e aplicações na geologia. Edgard Blucher, 1985.

GRESPLAN SETZ, L. F., MUNHOZ JR., A. H., A.R ZANDONADI, A.R. (2001). Reciclagem de resíduo de “pó de vidro” em cerâmica vermelha – utilização do método estatístico de Weibull na análise da resistência a flexão de corpos contendo teores diferentes de resíduo. Anais 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Florianópolis - SC

GRIM, R. E., “Clay Mineralogy” 1ª ed, Mc. Graw-Hill Book Company, New York, 1953.

GUIA DO VIDRO – Disponível

em: <<http://www.guiadovidro.com.br/Noticia.aspx?id=103>>. Acesso em 18 de Maio de 2011.

HAJJAJI, M *et al.*, (2002). Mineralogy and firing characteristics of a clay from valley of Ourika (Morocco). *Applied Clay Science*, Vol. 21, p. 203 – 212.

JOHNS, W. D. (1965). A review of Topotactic development of high temperature phases from two-layer silicates. *Ceramic Bulletin*. Vol. 44, p. 682 – 688.

LORYUENYONG, V. *et al.*, (2009). Effects of Recycled Glass Substitution on the Physical and Mechanical Properties of Clay Bricks. *Waste Management*. 29: 2717-2721.

LUZ A.P., RIBEIRO S. (2007). Use of glass waste as a raw material in porcelain stoneware tile mixtures. *Ceramics International*, v.33, p.761–765.

MEIRA, J. M. L. (2001). Argilas: o que são, suas propriedades e classificações. Comunicações técnicas. 01 – 07.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. (2002). Characterization of clays from Campos dos Goytacazes, North Rio de Janeiro State (Brazil). *Tile & Brick Int*, Vol. 18, p. 152 – 157.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. (2004). Solid state sintering of red ceramics at lower temperatures. *Ceramics International* 30, 381–387.

MORAIS, A. S. C. et. al. (2010). Recycling of Fluorescent Lamp Glass into Clayey Ceramic. In: TMS 2011 - 140th Annual Meeting & Exhibition, 2011, San Diego. EPD Congress 2011, 2011. v. 1. p. 1053-1060.

NAVARRO, J. M. F. (1991). *El Vidrio*, CSIC (Consejo superior de Investigaciones Científicas) – Madrid, Spain.

NORTON, F. H. (1973). *Introdução à Tecnologia das Cerâmicas*. Ed. da USP, São Paulo, SP.

PEREIRA FILHO, L. I.; COSIN, S.; VALERA, T. S.; TOFFOLI, S. M. (2002). Utilização de vidro em pó em cerâmica vermelha. *Anais do 46° Congresso Brasileiro de Cerâmica*, São Paulo, SP, p. 1187-1196.

PEREIRA FILHO, F.I., COSIN, S., TOFFOLI, S.M. (2002). Utilização de vidro em pó em cerâmica vermelha. Parte 2: Influência da Granulometria. *Congresso Brasileiro de engenharia e Ciência dos Materiais*. Natal – RN.

PILKINGTON (2010). Pilkington and the flat glass industry. Disponível em:< <http://www.pilkington.com/resources/pfgi2009final.pdf>>. Acessado em: 11 de Abril de 2011.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. (2010). Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. *Cerâmica* 56, 237-243.

PROJESUL – Disponível em:<http://www.projesul.com.br/mais_vidro.php.htm>. Acesso em 15 de Maio de 2011.

REED, S. J. (1995). Principles of ceramics processing. 2^a.ed. New York: John Wiley & Sons.

REIS, J. P. (2007). Incorporação de resíduos industriais em massa cerâmica usada na fabricação de Tijolos, Joinville/SC, 42 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade do Estado de Santa Catarina.

ROCHA, S. E. S.; CONSEZA, J. P.; BARROSO, D. V. (2007). Considerações sobre a indústria do vidro plano no Brasil. BNDES Setorial, *Rio de Janeiro*, n. 26, p. 101-138.

SÁNCHEZ-MUÑOZ, L. *et al.*, (2002). Modelamento do processo de gresificação de massas cerâmicas de revestimento. *Cerâmica* 48 (308) Out/Nov/Dez.

SANTOS, P. S. (1989). Ciência e Tecnologia de Argilas. vol. 1, Ed. São Paulo: Edgar Blucher, 408 p.

SANTOS, O. C. (2007). Influência da adição de rejeitos cerâmicos nas propriedades de cerâmica vermelha da região do recôncavo baiano, Natal/RN, 80 p. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SANTOS, W. J. (2009). Caracterização de vidros planos transparentes comerciais. *Scientia Plena*, VOL. 5, NUM. 2.

SENAI – Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas (2010). Disponível em:<<http://www.sbrt.ibict.br>>. Acesso em: 15 de Dezembro de 2010.

SILVA, E. O. S. (2007). Desenvolvimento de cerâmica vermelha utilizando rejeitos da construção civil. 75 f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SOARES, J. M. D., ZETTI, R. R., TAVARES, I. S., PINHEIRO, R. B. (2004). Panorama Sócio- Econômico das Indústrias de Cerâmica Vermelha da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul, *Cerâmica Industrial*, 39- 46.

SHELBY, J.E. (1997). *Introduction to Glass Science and Technology*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.

TALLINI JUNIOR, V. M. (2009). Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de lodo de estações de tratamento de água, microesferas de vidro de jateamento, sais de neutralização de ácidos de bateria e areia de fundição. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 83p.

TARVORNPANICH, T.; SOUZA, G. P. Use of soda-lime-silica waste glass as an alternative flux in traditional ceramics. GEOTHAI'07 International Conference on Geology of Thailand: Towards Sustainable Development and Sufficiency Economy.

USP – Universidade de São Paulo (2011). Disponível em: <<http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/bancovidros/histvidro.htm>> Acesso em: 06 de Abril de 2011.

VALLE, C. E. Qualidade Ambiental – ISO 14000. 5ª ed. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2004.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. (2003). Influência da temperatura de queima na microestrutura de argilas de Campos dos Goytacazes-RJ. *Cerâmica* **49**, 6-10.

VIEIRA, C. M. F.; CARDOSO, B. R.; MONTEIRO, S. N. (2003). Influência da adição de argila fundente em massa de cerâmica vermelha caulinítica. Jornadas SAM/CONAMET/SIMPÓSIO MATERIA.

- VIEIRA, C. M. F.; SILVA, P. R. N.; SILVA, F. T.; CAPITANEO, J. L.; MONTEIRO, S. N. (2005). Microstructural Evaluation and Properties of a Ceramic Body for Extruded Floor Tile. *Revista Matéria*, v. 10, n. 4, pp. 526 – 536.
- VIEIRA, C. M. F.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N. (2005). Microstructure Evolution in Kaolinitic Clay as a Function of Firing Temperature. *Building Materials, Interceram*, Vol. 54.
- VIEIRA, C. M. F.; TERRONES, L. A.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S.N. (2007). Características e efeito da fração granulométrica < 2 µm no comportamento de queima de uma argila. *Cerâmica* 53, 249-254.
- VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. (2009). Incorporation of solid waste in red ceramic – An updated review. *Revista Matéria*, v. 14, n. 3, pp. 881 – 905.
- VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M.; MONTEIRO, S.N. (2010). Massas cerâmicas para telhas: avaliação microestrutural. *Revista Matéria*, v. 15, n. 1, pp. 050 – 055.
- VIEIRA *et al.*, (2011). Reciclagem de material particulado de uma planta de sinterização de uma siderúrgica em cerâmica vermelha. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 8, n. 4, p. 243-247, out.-dez.
- VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M. (2011). Avaliação de argilas caulínicas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha. *Cerâmica* 57, 319-323.
- ZANOTTO, E. D.; MIGLIORI, A. R. (1991). Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: Uma introdução. *Ceramica*, 37 (274) janeiro/fevereiro.
- YOUSSEF, N. F; ABADIR, M. F; SHATER, M. A. O. (1998). Utilization of soda glass (cullet) in the manufacture of wall and floor tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, v.18, n.12, p.1721-1727.