

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ALESSANDRA SAVAZZINI DOS REIS

**PRODUÇÃO DE TELHA CERÂMICA COM INCORPORAÇÃO
SIMULTÂNEA DE RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE GRANITO,
LAMA DE ALTO FORNO E RESÍDUO DE MASSA CERÂMICA CRUA**

**SÃO PAULO
2015**

ALESSANDRA SAVAZZINI DOS REIS

**PRODUÇÃO DE TELHA CERÂMICA COM INCORPORAÇÃO
SIMULTÂNEA DE RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE GRANITO,
LAMA DE ALTO FORNO E RESÍDUO DE MASSA CERÂMICA CRUA**

Tese apresentada a Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Doutora em Engenharia

SÃO PAULO
2015

ALESSANDRA SAVAZZINI DOS REIS

**PRODUÇÃO DE TELHA CERÂMICA COM INCORPOERAÇÃO
SIMULTÂNEA DE RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE GRANITO,
LAMA DE ALTO FORNO E RESÍDUO DE MASSA CERÂMICA CRUA**

Tese apresentada a Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Doutora em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Francisco Rolando
Valenzuela Diaz

**SÃO PAULO
2015**

DEDICATÓRIA

**Dedico este trabalho a quem mais amo:
Meu esposo Marcelo e minha filha Bianca,
Meus pais José (*in memorian*) e Tereza,
Minha irmã Katiane e família,
E minha irmã Adalgiza (*in memorian*).**

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, por me guiar, dar saúde, força e vontade de lutar até o fim nesta longa jornada.

Ao meu esposo Marcelo pelo amor e compreensão com meus estudos e viagens.

A minha filha Bianca pelo amor, alegria e incentivo em todos os momentos e por estar sempre ao meu lado.

Aos meus pais José (*in memorian*) e Tereza, por tudo que sou, pelo incentivo e apoio que sempre me oferecem.

A toda minha família, principalmente aos que estavam mais próximos: minha querida irmã gêmea Katiane, cunhado Francisco, e sobrinhas: Gabriela, Fernanda e Juliana.

Ao meu professor orientador Dr. Francisco Rolando Valenzuela Diaz, que aceitou me orientar, e sempre me apoiou e acompanhou com toda sabedoria, dedicação, paciência e valiosas orientações que nortearam minha caminhada neste trabalho.

A professora Dra. Viviana Possamai Della Sagrillo (Ifes) pelo apoio e colaboração na pesquisa.

As revisoras de inglês Maria Luiza F. Linhalis (Ifes) e Cristina Borba (USP).

A todos os colegas do DINTER Ifes x PMT/EPUSP, pela amizade e companheirismo em especial, a Leila Verônica da Rocha Gomes.

Ao Ifes, em especial ao Campus Colatina pela confiança a mim depositada.

A USP e ao Ifes pela permissão de realização dos ensaios tecnológicos em seus laboratórios, em especial aos professores, técnicos e funcionários que me ajudaram.

A CAPES pelo apoio financeiro durante o estágio obrigatório.

A Fábrica de Cerâmica CINCO - Telhas Fort Simonassi, que me permitiu realizar este trabalho interagido com o setor produtivo.

Finalmente, agradeço a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Feliz do homem que encontrou sabedoria,
Daquele que adquiriu a inteligência,
Porque mais vale este lucro, que o da prata,
E o fruto que se obtém é melhor que o fino ouro.
Ela é mais preciosa que as pérolas,
Joia alguma a pode igualar.

É uma árvore de vida para aqueles que lançarem mãos dela.
Quem a ela se apega, é um homem feliz.
Foi pela sabedoria que o Senhor criou a terra,
Foi com inteligência que ele formou os céus.

Provérbios 3: 13-15, 18-19.

RESUMO

As indústrias brasileiras de rochas ornamentais e siderúrgica contribuem fortemente para o desenvolvimento econômico do Brasil. A indústria de rochas apresenta cerca de 10 mil empresas, respondendo por 120 mil empregos diretos e 360 mil indiretos. O país é o 4º maior produtor mundial de rochas. Já a produção acumulada da indústria siderúrgica até março de 2013 totalizou 8,3 milhões de toneladas de aço bruto e 6,2 milhões de toneladas de laminados. Porém essas indústrias geram grande quantidade de resíduos sólidos provenientes dos processos produtivos. Com a busca do desenvolvimento sustentável e com o aumento do rigor nas legislações de resíduos sólidos, torna-se necessário estudar alternativas de uso para os resíduos gerados. A indústria de cerâmica vermelha utiliza matéria-prima, constituída de materiais plásticos e não plásticos, cujos constituintes são de natureza heterogênea, o que permite incorporar resíduos de diferentes processos industriais na composição da massa cerâmica. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é estudar, utilizando argilas e resíduos disponíveis numa olaria em foco, diversas misturas constituídas de argilas e resíduos, visando determinar qual delas teria maior potencial de produzir telhas cerâmicas com melhores propriedades cerâmicas. Foram usadas matérias-primas normalmente utilizadas no processo industrial de fábrica de cerâmica vermelha situada em Colatina–ES: quatro argilas, resíduo de beneficiamento de granito, lama de alto forno e resíduo de massa cerâmica crua. As matérias-primas foram submetidas a ensaios de caracterização física, química, mineralógica e microestrutural, análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e termogravimetria (TG), e determinação dos limites de Atterberg. As matérias-primas, em diversas proporções, foram misturadas e corpos de prova foram conformados para queima em forno industrial contínuo tipo túnel para verificação de: resistência mecânica, absorção de água, retração, porosidade e massa específica aparentes. Os melhores resultados foram obtidos no teor de 46%, em massa, de resíduos. A partir daí, foram produzidas telhas cerâmicas em escala industrial com o teor de 46% de resíduos, sendo os teores de resíduo de beneficiamento de granito de 17%, resíduo de massa cerâmica crua de 24% e lama de alto forno de 5%, as quais apresentaram propriedades adequadas. Confirma-se com isso o alto potencial de incorporação de grande quantidade dos resíduos na massa cerâmica.

Palavras-chave: Telha cerâmica. Cerâmica vermelha. Resíduo de beneficiamento de granito. Lama de alto forno. Resíduo de massa cerâmica crua. Desenvolvimento sustentável.

—

ABSTRACT

The Brazilian industries of dimension stones and steel greatly contribute to the economic development of Brazil. The dimension stone industry has about 10,000 companies, which are responsible for 120,000 direct jobs and 360,000 indirect jobs. The country is the 4th largest world producer of stone. The accumulated production of the steel industry by march of 2013 totaled 8.3 million tons of crude steel and 6.2 million tons of hot rolled products. However, these industries generate large amount of solid waste from production processes. With the pursuit of sustainable development and the increased rigor in the legislations to solid waste, it is necessary to study alternatives of utilization to the waste generated. The structural ceramic industry uses raw materials, consisting of plastic and non-plastic materials, whose constituents are of heterogeneous nature, allowing the incorporation of waste from different industrial processes in the ceramic body composition. In this sense, the aim of this work is to study, using clays and wastes available in one pottery in focus, several mixtures consisting of clays and wastes, to determine which one would have the greatest potential to produce ceramic roof tiles with the best ceramic properties. The raw materials used in the research are normally used in a structural ceramic facility located in Colatina-ES: four clays, granite processing waste, blast furnace sludge and raw ceramic mass waste. The raw materials have been tested for physical, chemical, mineralogical and microstructural characterizations, differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetry (TG), and determination of Atterberg limits. The raw materials in various contents were mixed and shaped into specimens for burning in an industrial furnace-type tunnel to check: mechanical strength, water absorption, shrinkage, porosity and apparent density. The best results were obtained at 46% in weight waste content. From there, ceramic roof tiles were produced on an industrial scale with 46% waste, with granite processing waste of 17%, ceramic raw mass waste of 24% and blast furnace sludge of 5% which presented suitable properties. With this, the high potential to incorporation of large amount of the wastes in the ceramic body is confirmed.

Keywords: Ceramic roof tile. Structural ceramic. Granite processing waste. Blast furnace sludge. Raw ceramic mass waste. Sustainable development.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema da geração de resíduos na indústria das rochas ornamentais	20
Figura 2 – Teares e lagoa de sedimentação de resíduo no ES.....	21
Figura 3 – Principais estados produtores de aço no Brasil	22
Figura 4 – Fluxograma simplificado da geração de resíduos na siderurgia	22
Figura 5 – Resíduo de massa cerâmica crua em empresa de cerâmica vermelha ...	23
Figura 6 – Matérias-primas – coleta e preparação	34
Figura 7 – Gráfico da variação da temperatura do forno da fábrica de cerâmica em relação ao tempo de queima	38
Figura 8 – Exemplares dos corpos de prova e forno industrial usado para queima ..	39
Figura 9 – Etapas da fabricação e exemplares das telhas produzidas	45
Figura 10 – Detalhes dos ensaios realizados nas telhas	46
Figura 11 – Prognóstico de extrusão das matérias-primas	52
Figura 12 – Curvas de distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas .	52
Figura 13 – Difratogramas de raios X das matérias-primas secas a 110°C	57
Figura 14 – Difratogramas de raios X das matérias-primas após queima a 850°C ...	58
Figura 15 – DSC/TG/DTG das matérias-primas.....	60
Figura 16 – Imagens da microscopia óptica da argila Batinga	61
Figura 17 – Imagens da microscopia óptica da argila Berta.....	61
Figura 18 – Imagens da microscopia óptica da argila Guandu	62
Figura 19 - Imagens da microscopia óptica da argila Itapina	62
Figura 20 – Imagens da microscopia óptica do RBG	62
Figura 21 – Imagens da microscopia óptica da LAF	63
Figura 22 – Imagens da microscopia óptica do RMCC	63
Figura 23 – MEV da argila Batinga (seca a 110°C)	64
Figura 24 – MEV da argila Batinga (após queima a 850°C)	64
Figura 25 – MEV da argila Berta (seca a 110°C)	65
Figura 26 – MEV da argila Berta (após queima a 850°C)	65
Figura 27 – MEV da argila Guandu (seca a 110°C)	65
Figura 28 – MEV da argila Guandu (após queima a 850°C)	66
Figura 29 – MEV da argila Itapina (seca a 110°C)	66
Figura 30 – MEV da argila Itapina (após queima a 110°C)	66
Figura 31 – MEV do RBG (seco a 110°C)	67
Figura 32 – MEV do RBG (após queima a 850°C)	67
Figura 33 – MEV da LAF (seca a 110°C)	67
Figura 34 – MEV da LAF (após queima a 850°C)	68
Figura 35 – MEV do RMCC (seco a 110°C)	68

Figura 36 – MEV do RMCC (após queima a 850°C)	68
Figura 37 – Exemplares de barras e esferas da massa cerâmica final (46% de resíduos)	99
Figura 38 – DRX da massa cerâmica final (46% de resíduos)	100
Figura 39 – MEV da massa cerâmica final (46% de resíduos).....	101
Figura 40 – MEV da massa cerâmica final (46% de resíduos) na superfície de fratura dos corpos de prova	102
Figura 41 – MEV com EDS da massa cerâmica final (46% de resíduos).....	103
Figura 42 – Mapeamento de Si, Al, O e Fe da massa cerâmica final (46% de resíduos) em barra queimada a 850°C	104
Figura 43 – Prognóstico de extrusão da massa cerâmica final (46% de resíduos).104	
Figura 44 – Diagrama de Weibull nas barras e esferas da massa cerâmica final (46% de resíduos)	105
Figura 45 – Exemplares das telhas fabricadas.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades e limites da norma NBR 15310/2005.....	45
Tabela 2 – Análise ambiental do resíduo de beneficiamento de granito (RBG)	47
Tabela 3 – Análise ambiental da lama de alto forno (LAF).....	48
Tabela 4 – Análise ambiental do resíduo de massa cerâmica crua (RMCC)	49
Tabela 5 – Caracterização física das matérias-primas.....	51
Tabela 6 – Composição em óxidos constituintes das matérias-primas (% em peso) 55	
Tabela 7 – Propriedades cerâmicas e mecânicas das matérias-primas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C – valores médios	72
Tabela 8 – Propriedades cerâmicas e mecânicas das matérias-primas em barras secas a 110°C e queimadas a 850°C – valores médios	73
Tabela 9 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RBG e argila Batinga – valores médios.....	76
Tabela 10 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RBG e argila Berta – valores médios	77
Tabela 11 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RBG e argila Guandu – valores médios	78
Tabela 12 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RBG e argila Itapina – valores médios	79
Tabela 13 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RMCC e argila Batinga - valores médios	80
Tabela 14 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RMCC e argila Berta – valores médios	81
Tabela 15 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RMCC e argila Guandu – valores médios	82
Tabela 16 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RMCC e argila Itapina – valores médios	83
Tabela 17 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com LAF e argila Batinga – valores médios.....	84
Tabela 18 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com LAF e argila Berta – valores médios	85
Tabela 19 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com LAF e argila Guandu – valores médios	86
Tabela 20 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com LAF e argila Itapina – valores médios	87
Tabela 21 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RBG na massa argilosa – valores médios	90

Tabela 22 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RMCC na massa argilosa – valores médios.....	91
Tabela 23 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com LAF na massa argilosa – valores médios.....	92
Tabela 24 – Dosagens das massas argilosas industriais com incorporação dos resíduos	93
Tabela 25 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C na massa argilosa com incorporação simultânea dos 3 resíduos nos teores 0%, 38%, 42%, 46%, 50%, 54%, 58% e 62% (massa) – valores médios	95
Tabela 26 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em barras secas a 110°C e queimadas a 850°C na massa argilosa com incorporação simultânea dos 3 resíduos nos teores 0%, 38%, 42%, 46%, 50%, 54%, 58% e 62% (massa) – valores médios	96
Tabela 27 – Valores obtidos através da análise WEIBULL	105
Tabela 28 – Propriedades da Telha Americana produzida com massa cerâmica final (46% de resíduos)	107
Tabela 29 – Propriedades da Telha Portuguesa produzida com massa cerâmica final (46% de resíduos)	108
Tabela 30 – Propriedades da Telha Romana produzida com massa cerâmica final (46% de resíduos)	109
Tabela 31 – Análise ambiental da massa cerâmica final (CRUA 46% de resíduo) .	110
Tabela 32 – Análise ambiental da massa cerâmica final (QUEIMADA 46% de resíduo)	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ATG	Análise Termogravimétrica
DRX	Difração de Raios X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG	Termogravimetria Derivada
EDS	Espectrometria de Energia Dispersiva
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ES	Espírito Santo
FRX	Fluorescência de Raios X
Ifes	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica do Espírito Santo
IP	Índice de Plasticidade
LAF	Lama de Alto Forno
LDCM	Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LPSS	Laboratório de Materiais Não-metálicos Prof. Persio de Souza Santos
MEA	Massa Específica Aparente
MEAS	Massa Específica Aparente da Parte Sólida
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MG	Minas Gerais
NM	Norma Mercosul
NBR	Norma Brasileira Registrada
PA	Porosidade Aparente
PF	Perda de Massa Após Queima (Perda ao Fogo)
PIB	Produto Interno Bruto
PMT	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
PS	Perda de Massa Após Secagem

RL _S	Retração Linear Após Secagem
RL _Q	Retração Linear Após Queima
RV _S	Retração Volumétrica Após Secagem
RV _Q	Retração Volumétrica Após Queima
RBG	Resíduo de Beneficiamento de Granito
RMCC	Resíduo de Massa Cerâmica Crua
RS	Rio Grande do Sul
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
TG	Termogravimetria
TR	Tensão de ruptura à flexão
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa e importância do trabalho.....	17
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo geral.....	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
2 – REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 Resíduos sólidos.....	19
2.2 Resíduo do beneficiamento de granito	19
2.2.1 Geração do resíduo de beneficiamento de granito	19
2.2.2 Quantidade gerada de resíduo de beneficiamento de granito	21
2.3 Lama de alto forno	21
2.3.1 Geração da lama de alto forno	21
2.3.2 Quantidade gerada da lama de alto forno.....	23
2.4 Resíduo de massa cerâmica crua	23
2.4.1 Geração do resíduo de massa cerâmica crua	23
2.4.2 Quantidade gerada do resíduo de massa cerâmica crua	24
2.5 Indústria cerâmica.....	24
2.5.1 Matéria-prima da indústria de cerâmica vermelha	24
2.5.2 Processo de fabricação da indústria de cerâmica vermelha.....	25
2.6 Resíduos na massa argilosa usada em cerâmica vermelha.....	25
2.6.1 Resíduo de beneficiamento de granito na massa cerâmica	25
2.6.2 Lama de alto forno na massa cerâmica	29
2.6.3 Resíduo da massa cerâmica crua na massa cerâmica.....	31
2.6.4 Discussão dos estudos	31
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Materiais.....	32
3.1.1 Argilas.....	32
3.1.2 Resíduo de beneficiamento de granito (RBG)	32
3.1.3 Lama de alto forno (LAF)	32
3.1.4 Resíduo de massa cerâmica crua (RMCC)	32
3.2 Métodos.....	32

3.2.1 Coleta e preparação das amostras	33
3.2.2 Caracterização das matérias-primas	34
3.2.2.1 Caracterização ambiental dos resíduos	34
3.2.2.2 Caracterização física das matérias-primas	34
3.2.2.3 Análise química das matérias-primas.....	34
3.2.2.4 Análise mineralógica das matérias-primas.....	35
3.2.2.5 Análise do comportamento térmico das matérias-primas.....	35
3.2.2.6 Microscopia óptica das matérias-primas	35
3.2.2.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das matérias-primas	35
3.2.2.8 Poder calorífico da lama de alto forno.....	36
3.2.3 Estudo de incorporação dos resíduos na massa argilosa.....	36
3.2.4 Conformação dos corpos de prova	37
3.2.5 Propriedades cerâmicas e mecânicas dos corpos de prova	39
3.2.5.1 Absorção de água e porosidade aparente	39
3.2.5.2 Massa específica aparente (MEA)	40
3.2.5.3 Massa específica aparente da parte sólida (MEAS).....	40
3.2.5.4 Perda de massa	40
3.2.5.5 Retração volumétrica das esferas	41
3.2.5.6 Retração linear das barras	41
3.2.5.7 Tensão de ruptura à flexão a 3 pontos das barras	42
3.2.5.8 Resistência à compressão das esferas.....	42
3.2.6 Análise microestrutural da massa cerâmica final	42
3.2.7 Limites de consistência da massa cerâmica final	43
3.2.8 Análise estatística Weibull	43
3.2.9 Produção das telhas cerâmicas em escala industrial	44
3.2.10 Propriedades das telhas cerâmicas produzidas em escala industrial.....	45
3.2.11 Caracterização ambiental da massa cerâmica final e das telhas produzidas	46
4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	47
4.1 Caracterização das matérias-primas	47
4.1.1 Caracterização ambiental dos resíduos	47
4.1.1.1 Caracterização ambiental do RBG	47
4.1.1.2 Caracterização ambiental da LAF	48
4.1.1.3 Caracterização ambiental do RMCC	49

4.1.2 Caracterização física das matérias-primas	50
4.1.3 Análise química por FRX das matérias-primas.....	53
4.1.4 Análise mineralógica por difração de raios X (DRX) das matérias-primas....	55
4.1.5 Análise do comportamento térmico das matérias-primas	58
4.1.6 Microscopia óptica das matérias-primas.....	61
4.1.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das matérias-primas	63
4.1.8 Poder calorífico da lama de alto forno	69
4.2 Propriedades cerâmicas e mecânicas das matérias-primas	69
4.3 Estudo da incorporação dos resíduos na massa argilosa – 1^a etapa.....	74
4.4 Estudo da incorporação dos resíduos na massa argilosa – 2^a etapa.....	88
4.5 Estudo da incorporação simultânea dos resíduos na massa argilosa – 3^a etapa.....	93
4.6 Análise microestrutural na massa cerâmica final (46% de resíduos).....	99
4.6.1 DRX na massa cerâmica final (46% de resíduos)	100
4.6.2 MEV com EDS na massa cerâmica final (46% de resíduos)	100
4.7 Limites de consistência na massa cerâmica final (46% de resíduos)	104
4.8 Análise estatística de Weibull na massa cerâmica final após queima (46% de resíduos).....	105
4.9 Propriedades das telhas cerâmicas produzidas com massa cerâmica final (46% resíduos).....	106
4.10 Caracterização ambiental na massa cerâmica final (46% de resíduos)....	110
5 – CONCLUSÕES	112
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

1 – INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e importância do trabalho

Segundo Simon e Defries (1992), o desenvolvimento sustentável visa atender as necessidades e os sonhos das gerações atuais e futuras, sem comprometer a possibilidade das gerações futuras satisfazerem suas necessidades. A maioria dos modelos de produção mundiais e as sociedades atuais buscam de toda a forma produção e consumo elevados, com isso crescendo desobedecendo ao desenvolvimento sustentável. Aliados a isso, o crescimento da população e os processos de urbanização e industrialização aumentam o volume de resíduos sólidos gerados, que são as maiores fontes de degradação do meio ambiente. Diante disso, a natureza não consegue processar os resíduos gerados de forma a manter os padrões de consumo atuais.

Para se almejar a sustentabilidade, deve haver transformações na cultura e na organização social da sociedade, e nos processos industriais, para que sejam reduzidos o consumo da população e a geração de resíduos; e para que os resíduos ainda gerados sejam bem gerenciados e reaproveitados. Assim, a reciclagem e/ou reaproveitamento de resíduos é uma das formas de diminuir o consumo de matérias-primas, aumentar a vida útil de aterros industriais e atenuar riscos ambientais.

Na prática, a valorização do resíduo é concretizada com a transferência da tecnologia de reciclagem ou reutilização para o setor industrial com a produção em larga escala. Verifica-se com isso, a necessidade do conhecimento de pesquisas desenvolvidas sobre utilização de resíduos para que sejam colocadas em prática.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar, utilizando argilas e resíduos disponíveis numa olaria em foco, diversas misturas constituídas de argilas e resíduos, visando determinar qual delas tem maior potencial de produzir telhas com melhores propriedades cerâmicas.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos para o atendimento do objetivo geral são:

- a) realizar revisão de literatura objetivando conhecer o desenvolvimento científico e técnico na incorporação do resíduo de beneficiamento de granito, da lama de alto forno e do resíduo de massa cerâmica crua em massa argilosa;
- b) caracterizar as argilas, o resíduo de beneficiamento de granito, a lama de alto forno e o resíduo de massa cerâmica crua (pertencentes ao estoque de fábrica de cerâmica vermelha situada em Colatina-ES) quanto a suas composições física e química, fases mineralógicas, microestrutura, comportamento térmico, distribuição de tamanho de partículas, limites de Atterberg; além da avaliação das propriedades cerâmicas e mecânicas;
- c) estudar a incorporação dos resíduos em diferentes teores na mistura argilosa por meio da avaliação das propriedades cerâmicas e mecânicas medidas em corpos de prova prensados (barras) e conformados manualmente (esferas) queimados em forno industrial tipo túnel contínuo de fábrica de cerâmica vermelha, considerando as reais condições de queima industrial;
- d) fabricar telhas cerâmicas em escala industrial em fábrica de cerâmica vermelha situada em Colatina-ES com massa cerâmica contendo máximo teor de resíduos para verificar o atendimento às normas.

2 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Resíduos sólidos

A NBR 10004/2004 (ABNT, 2004, p.1) define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nessa definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem impossível o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente impraticáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Os resíduos são classificados de acordo com a sua periculosidade e solubilidade.

Segundo a NBR 10004/2004, os resíduos são classificados em: resíduos Classe I (perigosos) e resíduos Classe II (não-perigosos). Os resíduos considerados como Classe II (não-perigosos) podem ser classificados em:

- a) resíduos Classe II A – não-inertes;
- b) resíduos Classe II B – inertes.

Os resíduos perigosos são aqueles que podem apresentar risco a saúde pública e ao meio ambiente. Os resíduos da Classe II B são aqueles que quando ensaiados conforme a NBR 10006/2004, não têm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Já os resíduos da Classe II A, considerados como não-inertes, são aqueles que não se enquadram nas classificações I (perigosos) e II B (inertes).

2.2 Resíduo do beneficiamento de granito

2.2.1 Geração do resíduo de beneficiamento de granito

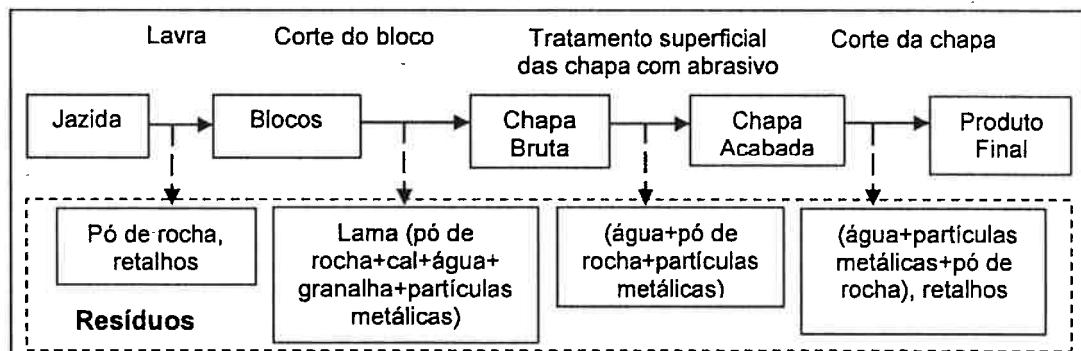
A indústria brasileira de extração e beneficiamento de rochas ornamentais apresenta grande desenvolvimento. O Brasil está entre os maiores produtores mundiais de rochas ornamentais, se situa em 4º lugar na produção e em 7º lugar na exportação de rochas (ABIROCHAS, 2013). A indústria de rochas no Brasil apresenta cerca de 10 mil empresas, sendo 400 exportadoras, respondendo por cerca de 105 mil empregos diretos e 1500 frentes de lavra (MONTANI, 2014).

Em 2014, a produção brasileira de rochas ornamentais foi de 10,1 milhões de

toneladas e foram exportadas 2,5 milhões de toneladas com 51% das rochas já processadas. Cerca de 64% da produção de rochas no Brasil está na região sudeste, principalmente no Espírito Santo e Minas Gerais (ABIROCHAS, 2015).

As atividades de extração e beneficiamento das rochas ornamentais se iniciam nas lavras, onde são extraídos blocos de rocha retangulares com volumes variando de 5 m³ a 10 m³. Após isso, o beneficiamento se divide em três etapas: corte do bloco em chapas; tratamento superficial das chapas; e corte das chapas em dimensões comerciais. Em todas as etapas do processo há a geração de resíduos (Figura 1).

Figura 1 - Esquema da geração de resíduos na indústria das rochas ornamentais



Fonte: Gomes, Lameiras e Rocha (2004), p.15, adaptado

No beneficiamento, a etapa do corte do bloco é feito em teares de fios diamantados (Figura 2a) ou de lâminas metálicas (Figura 2b). Para auxiliar o corte do bloco, usa-se uma lama abrasiva constituída de pó de rocha e água para o tear de fio diamantado. No tear de lâminas metálicas, a lama é acrescida de cal e granilha de aço. A lama recircula durante o corte do bloco e quando sua viscosidade aumenta ela é descartada e se junta ao resíduo formado de água, pó de rocha e restos de abrasivos usados no tratamento superficial da chapa e se tornam o resíduo estudado neste trabalho.

Em geral, o resíduo gerado é depositado em lagoas de sedimentação diretamente no solo (Figura 2c) ou em tanques impermeabilizados. A lama seca naturalmente ou perde umidade no filtro prensa, e depois é levada a aterros industriais, o que condiciona a gastos consideráveis com transporte e disposição.

Figura 2 – Teares e lagoa de sedimentação de resíduo no ES



(a) Tear de fios dimantados

(b) Tear de lâminas metálicas

(c) Lagoa de sedimentação

Fonte: Autora (2012)

Segundo Almeida e Pontes (2001) e Aguiar (2012), o resíduo quando seco se torna um pó muito fino, e ao ser lançado diretamente nos cursos d'água (PONTES; STELLIN JR, 2001) ou no solo (SOUZA; PINHEIRO; HOLANDA, 2011), pode assorear córregos e rios e contaminar o solo, além de ser nocivo à saúde humana de acordo com Torres et al. (2004) e Moreira, Manhães e Holanda (2005) acarretando sérios problemas ambientais.

2.2.2 Quantidade gerada de resíduo de beneficiamento de granito

De acordo com Vieira (2004), Mello et al. (2006), Cavalcanti (2006) e Reis e Alvarez (2007), o volume de resíduo gerado no corte do bloco de granito representa 30% do volume do bloco. No Brasil, a quantidade de resíduo gerado no processamento das rochas em 2014 foi de 3,65 milhões de toneladas (ABIROCHAS, 2015).

2.3 Lama de alto forno

2.3.1 Geração da lama de alto forno

O aço é um produto reciclável e de extrema importância na atividade humana, figura como elemento essencial em diversas cadeias produtivas.

Dados do Instituto Aço Brasil (2014) mostram que a indústria de aço no Brasil ocupa o 9º lugar como produtor mundial e está instalada em dez estados (Figura 3), sendo que 93% da produção nacional de aço em 2013 ficou concentrada na região Sudeste com o Espírito Santo sendo o 4º maior produtor no país, depois de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2014). O setor possui uma capacidade instalada para fabricar mais de 48,9 milhões de t/ano de aço bruto, e conta com 29 usinas de grande porte

(INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015). As siderúrgicas são responsáveis por terem gerado 109 mil empregos em 2011, e respondem por 4% no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2012).

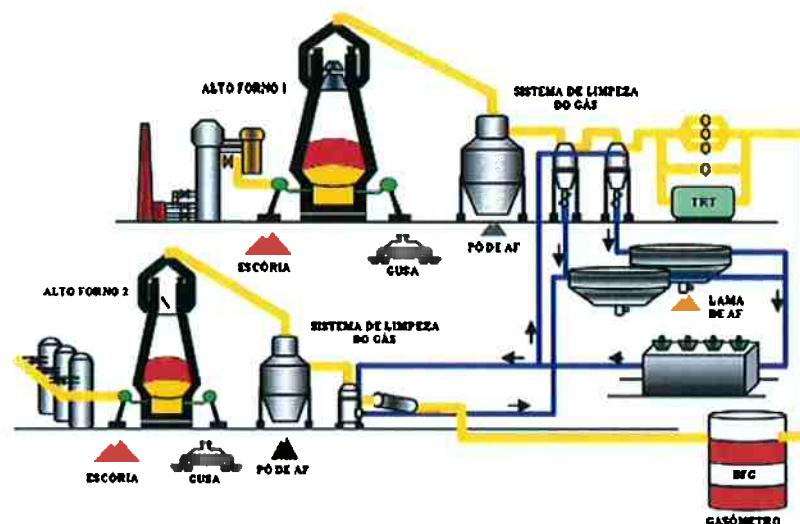
Figura 3 – Principais estados produtores de aço no Brasil



Fonte: Instituto Aço Brasil (2012), p.14, adaptado

O processo de fabricação do aço gera resíduos ao longo das etapas (Figura 4), que podem contaminar solo, ar e água se não forem dispostos adequadamente, o que ocorre em algumas indústrias, de acordo com Almeida e Melo (2001).

Figura 4 – Fluxograma simplificado da geração de resíduos na siderurgia



Fonte: Arcelor Mittal (2014)

A lama de alto forno é um desses resíduos, a qual apresenta granulometria fina e é constituída predominantemente por óxidos de ferro, provenientes do minério de ferro e por finos de coque, provenientes do carbono (VIEIRA et al., 2007; DAS et al.,

2007). A lama é gerada na produção do ferro-gusa, na etapa de limpeza a úmido dos gases do alto-forno, o qual carrega consigo material fino e particulado, que se torna o resíduo em questão. Quando a limpeza dos gases é feita a seco gera-se resíduo na forma de pó. Das et al. (2007) afirmam que a reciclagem do pó do alto forno na siderúrgica é prejudicada devido à presença de zinco, chumbo e metais alcalinos, os quais podem causar problemas operacionais interferindo nas reações que ocorrem no alto forno.

2.3.2 Quantidade gerada da lama de alto forno

Segundo o Instituto Aço Brasil (2012), uma tonelada de aço bruto gera em média 600 Kg de resíduos sólidos, tais como, escórias, pós, lamas e carepas. A lama de alto forno representou 5% desse total de resíduo gerado em 2011 correspondendo a 30 Kg/t aço bruto, valor também apresentado por Silva (2007). A siderúrgica Arcelor Mittal situada em Serra-ES gera mensalmente 4,5 mil toneladas de lama de alto forno (ARCELOR MITTAL, 2014). Segundo Mothé (2008), aproximadamente 3 mil toneladas de lama de alto forno são comercializadas mensalmente para 25 empresas de cerâmica vermelha no estado do Espírito Santo.

2.4 Resíduo de massa cerâmica crua

2.4.1 Geração do resíduo de massa cerâmica crua

O resíduo (Figura 5a) é proveniente do processo de fabricação dos produtos de cerâmica vermelha. É gerado na etapa de conformação das peças, sendo composto por rebarbas de prensagem das telhas (Figura 5b) e de extrusão dos blocos e por peças recém-moldadas descartadas devido a defeitos visuais.

Figura 5 – Resíduo de massa cerâmica crua em empresa de cerâmica vermelha



(a) Pilha de resíduo

(b) Rebarba da prensagem de telha

Fonte: Autora (2015)

2.4.2 Quantidade gerada do resíduo de massa cerâmica crua

Na literatura pesquisada não foi encontrada a quantidade gerada de resíduo de massa cerâmica crua. Através de dados obtidos na fábrica de cerâmica CINCO (ES), pode-se estimar que cerca de 40% do volume produzido na fábrica se torna resíduo na etapa de conformação das peças (informação verbal)¹.

2.5 Indústria cerâmica

Segundo dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER, 2015), existem cerca de 6,9 mil empresas de cerâmica no Brasil com produção dividida em 63% de blocos, 36% de telhas e 1% de tubos, que somados totalizam uma produção mensal de 5,3 bilhões de peças consumindo 10,3 milhões de toneladas de argila ao mês. A indústria gera 293 mil empregos diretos e 900 mil empregos indiretos.

2.5.1 Matéria-prima da indústria de cerâmica vermelha

A indústria de cerâmica vermelha, que fabrica produtos cerâmicos estruturais, tais como, telhas e blocos, os quais ocupam um papel de destaque na construção civil, utiliza a argila como matéria-prima.

Segundo Souza Santos (1975), a argila é um material natural, terroso, que apresenta plasticidade quando misturada a água, e granulometria fina. Ela é moldada na forma final de uso e queimada a temperaturas elevadas (SOUZA SANTOS, 1975; KAZMIERCZAK, 2007). De acordo com a NBR 6502/1995, a dimensão dos grãos da argila são inferiores a 2 µm. Quimicamente as argilas são formadas de silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio.

A argila usada na fabricação de cerâmica vermelha é de natureza heterogênea, constituída de materiais plásticos e não plásticos, com composições variadas, o que permite incorporar resíduos provenientes de diferentes processos industriais. Além disso, deve ser ressaltada a alta capacidade da indústria cerâmica de neutralizar resíduos tóxicos inseridos nas massas argilosas (FERREIRA, 2012).

A telha cerâmica, foco deste trabalho e principal produto de cerâmica vermelha, é obtida a partir de argilas cauliníticas e/ou ilíticas associadas à matéria orgânica e

¹ Informação fornecida pelo Sr. Antonio Bras Racanelli – gerente de produção da fábrica de cerâmica CINCO situada em Colatina-ES, em 05 de março de 2015.

óxidos de ferro (SANTOS et al., 2012).

Há relatos de que na prática ceramista é muito comum a escolha das matérias-primas e a formulação de massas cerâmicas serem feitas de forma empírica, o que dificulta a padronização do produto final. O estudo das massas argilosas empregadas nas indústrias de cerâmica vermelha tem como finalidade buscar informações que possam favorecer a obtenção de produtos de melhor qualidade.

2.5.2 Processo de fabricação da indústria de cerâmica vermelha

As principais etapas de fabricação dos produtos de cerâmica vermelha são:

- preparação das matérias-primas;
- conformação e fabricação – nesta etapa é adicionada água necessária para plasticidade na extrusão. No caso da telha, após isso é feita a prensagem;
- processamento térmico – o material já conformado é seco a 110°C e depois queimado no forno a temperaturas que variam de 850°C a 1050°C; e
- acabamento (nas telhas pode haver esmaltação ou impermeabilização).

2.6 Resíduos na massa argilosa usada em cerâmica vermelha

Considerando a importância da atividade siderúrgica e do setor de rochas para o Brasil, em especial para o ES, e as características da indústria cerâmica, deve-se estudar o potencial de incorporação dos resíduos gerados nessas indústrias na massa argilosa.

2.6.1 Resíduo de beneficiamento de granito na massa cerâmica

A revisão de literatura apresenta vários estudos de utilização do resíduo de beneficiamento de granito na indústria cerâmica. Apesar de haver grande número de pesquisas no Brasil, poucos estudos acadêmicos se tornaram inovações tecnológicas, ou seja, a utilização propriamente dita do resíduo ainda é pequena. O resíduo de beneficiamento de granito adicionado às massas cerâmicas, provoca a redução da plasticidade e pode atuar como agente formador da fase vítreia, preenchendo os poros do material.

Neves et al. (1999) usaram o resíduo de granito em mistura argilosa nos teores 40%, 50% e 60% (massa) para tijolos cerâmicos. Após queima, a mistura com 50% de resíduo obteve menores valores de absorção e de porosidade aparente e aumento

de resistência à compressão. Dando continuidade a pesquisa de Neves et al. (1999), Neves et al. (2000) testaram o resíduo de granito em revestimentos cerâmicos no teor de 31% (massa). Os corpos cerâmicos queimados com resíduo apresentaram comportamento típico de grê-s-cerâmico semiporoso a 1150°C, e de semigrê-s cerâmico a 1200°C.

Pontes e Stellin Júnior (2001, 2005) e Almeida e Pontes (2001) estudaram a separação magnética do ferro presente no resíduo de granito (teor passou de 3,2% para 0,7% no resíduo). O resíduo com 0,7% de ferro substituiu 30% da massa de argila na fabricação da cerâmica e diminuiu a plasticidade.

Nunes et al. (2002) estudaram o uso do resíduo de granito em revestimento cerâmico, usando a metodologia de Neves et al. (2000). Foram estudadas massas cerâmicas com 15% a 41% (massa) de resíduo a 1050°C, 1100°C e 1150°C; as massas apresentaram comportamentos típicos de material cerâmico: poroso, semiporoso e grê-s, respectivamente de acordo com a absorção de água obtida.

Neves (2002) estudou o uso do resíduo em cerâmica vermelha nos teores de 20% a 60%, com queima a 800°C, 900°C e 1000°C. O melhor resultado para o bloco, foi o teor de 55%, e para telha, foi o teor de 40%.

Na pesquisa de Menezes et al. (2002), o resíduo foi usado para blocos e revestimentos cerâmicos. As misturas foram feitas com resíduo de 20% a 60% (massa) nos blocos, o que resultou em aumento da absorção de água e redução da resistência à compressão. Mesmo assim, os teores de até 50% de resíduo atenderam à norma. E para revestimento, os teores foram de 15% a 40%, neste caso os produtos apresentaram características do grupo “B III”, classificação dada ao revestimento que apresenta absorção de água maior que 10%.

Menezes et al. (2005) avaliaram o resíduo de granito na produção de blocos e pisos cerâmicos. No estudo de Nunes et al. (2003a), o objetivo foi usar o resíduo em revestimentos cerâmicos, ambos trabalhos seguiram a metodologia de Menezes et al. (2002). Em Menezes et al. (2005), as composições com até 55% de resíduo atenderam à norma de blocos; e nos pisos, o teor aceito foi de 35%. Já, em Nunes et al. (2003a), os corpos cerâmicos com 35% de resíduo a 1150°C classificaram-se como: semigrê-s, material poroso e semiporoso de acordo com a absorção de água.

Em Nunes et al. (2003b), o resíduo foi adicionado no teor de 35% em revestimento

cerâmico obtido através de laminação. Foi verificado que a 1150°C ocorreu o menor valor de absorção de água e o valor máximo de tensão de ruptura à flexão.

Xavier, Albuquerque e Alexandre (2003) prepararam misturas argilosas com vários teores de resíduo e concluíram que o uso de 5% de resíduo a 900°C produziu peças cerâmicas de baixa absorção de água e menor retração linear.

Em Moreira, Freire e Holanda (2003) foram feitas misturas argilosas com 5% e 10% de resíduo (massa) para cerâmica vermelha. Após queima a 850°C até 1150°C, a retração linear teve um leve decréscimo. A absorção de água atendeu à norma e a tensão de ruptura à flexão diminuiu. Foi sugerido inserir baixo teor de resíduo.

Vieira, Peçanha e Monteiro (2003) estudaram a adição de resíduo de granito na massa cerâmica de telhas. Foram feitas misturas nos teores de 20%, 30% e 40% (massa) de resíduo. A retração linear diminuiu. E com 40% de resíduo, foram obtidos melhores valores de absorção de água e resistência mecânica, a 850°C até 1000°C.

Em Vieira (2004) foram feitas misturas de argila e resíduo em até 50% (massa). Houve redução na retração linear e aumento na porosidade e absorção de água, porém dentro dos limites. A resistência à flexão diminuiu para misturas queimadas a 900°C e 1050°C. Em 1100°C e 1150°C, a redução da resistência foi atenuada.

Silva et al. (2005) fizeram misturas com argila e resíduo nos teores de 10% a 50% (massa), que foram sinterizadas a 900°C e 1150°C. Verificou-se que para todas as temperaturas de queima, a massa específica e a absorção de água atenderam à norma, e a tensão de ruptura foi máxima em 30% de resíduo.

Segadães, Carvalho e Acchar (2005) confeccionaram misturas argilosas para piso cerâmico com resíduo em até 30% (massa), que foram queimadas a 1100°C e 1150°C. Houve melhoria nos valores de retração de queima, absorção de água e resistência mecânica, evidenciando a possibilidade de usar temperaturas mais baixas de queima para os produtos cerâmicos analisados.

Em Acchar, Vieira e Hotza (2006), o resíduo em até 50% (massa) na mistura argilosa promoveu melhoria na absorção de água, na densidade e na tensão de ruptura à flexão em temperaturas acima de 1050°C.

De Mello (2006) preparou massas de argilito com resíduo de granito nos teores de 8% a 40% (massa). Os valores da absorção de água, da porosidade aumentaram e

da massa específica aparente e da resistência mecânica diminuíram com o aumento do teor de resíduo, porém atenderam à norma até o teor de 40%.

Ribeiro et al. (2007) estudaram o uso do resíduo em revestimento cerâmico. Através da metodologia de planejamento experimental dos valores de absorção de água e retração de queima; foi verificado o teor ideal de 20% de resíduo (massa).

Acchar e Dantas (2007) analisaram massas de argila e resíduo nos teores de 10% a 50% (massa). Com o aumento do teor de resíduo aliado ao aumento da temperatura de queima, diminuíram porosidade e absorção de água; e houve aumento da tensão de ruptura à flexão em até 50% de resíduo.

Mothé Filho (2007) variou o teor de resíduo de 5% a 30% (massa) na massa argilosa de lajotas estruturais queimadas a 800°C até 1125°C. Os resultados de absorção de água, densidade e porosidade aparentes, e resistência à compressão dos tijolos mostraram que é possível a adição de resíduo em até 30%.

Manhães, Moreira e Holanda (2009), avaliaram a massa argilosa com resíduo de granito nos teores 10% e 20% (massa). Acima de 950°C, o resíduo em até 20% aumentou a densificação e diminuiu defeitos na microestrutura. Esses resultados corroboram o trabalho de Souza, Pinheiro e Holanda (2011), onde em até 30% de resíduo na massa argilosa de piso cerâmico, obtiveram melhorias na microestrutura.

Ferreira (2012) testou o resíduo de granito em teores 10%, 20% e 30% em blocos cerâmicos, que atenderam a absorção de água e a resistência à compressão. O bloco com teor de 30% foi classificado ambientalmente como Classe II-B (inerte).

Rodrigues et al. (2012), estudaram a durabilidade em peças cerâmicas com resíduo de granito, e verificaram que as peças queimadas a 900°C com 10% de resíduo tiveram maior durabilidade e confiabilidade nos resultados pela estatística Weibull.

Em Taguchi et al. (2014) foram feitas misturas argilosas com 20% a 80% (massa) de resíduo queimadas a 900°C, 1000°C e 1100°C. Retração linear e resistência à flexão diminuíram, porém até 60% de resíduo a 1100°C, os resultados foram satisfatórios.

Em Bildhauer et al. (2015), o resíduo foi adicionado para produzir tijolos nos teores de 5% a 40% (massa). Retração e resistência à compressão diminuíram, absorção de água aumentou. Porém, em até 20% foi atendida a norma para tijolos cerâmicos.

2.6.2 Lama de alto forno na massa cerâmica

A reutilização da lama de alto forno, bem como, dos outros resíduos da indústria do aço são essenciais para a conservação dos metais e recursos minerais, bem como, para proteção do meio ambiente (DAS et al., 2007). No caso da lama de alto forno, há a presença de zinco (LOBATO, 2014), motivo pelo qual a lama não é reaproveitada no processo siderúrgico, sendo necessário outras alternativas de uso. Apesar disso, existem poucos trabalhos sobre a utilização da lama de alto forno em outras indústrias.

A lama contribui para a economia energética e para uniformizar a temperatura do forno na queima de produtos de cerâmica vermelha devido ao calor adicional que a lama promove segundo Vieira et al. (2007) e Oliveira, Silveira e Assis (2012). Ferreira Filho et al. (2011), também ressaltam o uso da lama de alto forno como combustível e fonte metálica devido aos altos teores de carbono e ferro que possui. Sendo assim, uma das alternativas para reciclagem deste resíduo é o uso em processos de aglomeração e queima.

No trabalho de Almeida e Melo (2001) foram feitas massas argilosas com teores de 8%, 10% e 12% (volume) da lama de alto forno, obtendo-se os melhores resultados de resistência mecânica em 10%. Foi verificado que a lama auxilia na coloração avermelhada dos materiais devido à presença de óxidos de ferro e contribui com um ganho energético de até 50% no processo em função da sua alta taxa de carbono. Logo, o poder calorífico da lama de alto forno libera calor no interior da argila durante a queima e diminui o consumo de combustível primário. Tal fato é exposto por Abreu (2013), onde ceramistas afirmam que 10% de lama na massa argilosa economiza 40% de combustível e o tempo de queima passa de 80 h para 48 h. Entretanto, Diaz (2013) afirma que o uso de resíduos combustíveis, neste caso a lama de alto forno, pode diminuir a resistência mecânica devido à criação de poros. E se a queima não provocar a adequada oxidação do resíduo, o carbono não atua como agente redutor na queima e pode originar defeitos, como o “coração negro”.

Ainda em Almeida e Melo (2001), a lama de alto forno foi caracterizada como um resíduo de Classe I, ou seja, “perigoso”, pois apresentou fenóis acima do limite especificado pela norma ABNT NBR 10004/2004. Porém, segundo os autores, os fenóis encontrados foram destruídos na queima e os gases emitidos não foram

afetados. Esse fato corrobora com Vieira et al. (2007) e Abreu (2013), que afirmam que materiais potencialmente tóxicos presentes na lama são inertizados durante a queima da peça cerâmica. Weky Silva (2007), ainda acrescenta a presença de ferro, alumínio e manganês, além dos fenóis, e classifica a lama de alto forno como Classe II A, ou seja, “não perigosa e não inerte”.

Oliveira e Holanda (2004) inseriram 0,5% a 3,0% (massa) de resíduo siderúrgico na massa argilosa. A variação das propriedades cerâmicas em função do teor de resíduo foi bem complexa, mas concluíram que o resíduo pode ser reaproveitado.

Vieira et al. (2007) inseriram a lama de alto forno em 5%, 10% e 20% (massa) na massa argilosa. Com o aumento do teor da lama de alto forno, a absorção de água e a retração linear aumentaram e a tensão de ruptura diminuiu, o que foi devido à composição química da lama (hematita permanece inerte na queima e os finos de coque aumentam a porosidade). Foi sugerido a inserção de 5%, pois causou menos efeitos deletérios. O mesmo teor de 5% de lama na massa argilosa foi sugerido por Mothé (2008) devido aos efeitos causados, tais como, a porosidade gerada pela combustão dos finos de coque, a decomposição da calcita e a presença de compostos de ferro na microestrutura da cerâmica. Em Vieira et al. (2012), os teores de lama incorporada à massa cerâmica foram: 0%; 2,5%; 5% e 10% (massa). A retração linear, a absorção de água e a tensão de ruptura à flexão aumentaram com 5% e 10% de lama, resultados diferentes do trabalho de Vieira et al. (2007). Foi ressaltado por Vieira et al. (2012), que a lama pode apresentar composição química diferente dependendo do processo de beneficiamento, o que resultaria em desempenho diferente na massa argilosa.

Carreiro e Almeida (2011), adicionaram lama de alto forno em teores de 5% a 20% (massa) em cerâmica vermelha e verificaram que em até 10% de lama os resultados foram satisfatórios, porém a partir daí a lama ocasionou aumento da absorção de água e da retração linear e redução da tensão de ruptura à flexão.

Lima, Reis e Borges (2013), usaram a lama de alto forno, denominada “Fercoque”, nos teores de 1,5%; 3% e 4% na massa argilosa a 900°C. A inserção do resíduo aumentou a porosidade e diminuiu a resistência. O teor de 3% apresentou valor mais elevado de tensão de ruptura à flexão e atendeu à norma de cerâmica vermelha.

Abreu (2013) inseriu os teores de 2,5%; 5%; 7,5% e 10% (massa) de lama de alto

forno em massas argilosas, a temperaturas de 750°C e 900°C, a lama não alterou significativamente a absorção de água e a plasticidade; e diminuiu a tensão de ruptura à flexão em até 5% de lama, a partir daí a tensão se manteve constante. Em 5% de lama houve redução de 44,3% no consumo de combustível na queima.

Apesar dos estudos, a disposição a céu aberto dos resíduos da siderurgia ainda é uma prática sistemática, o que pode gerar passivos ambientais relevantes (ALMEIDA; MELO, 2001; OLIVEIRA; MARTINS, 2003), tal como, a contaminação de solo e águas subterrâneas pela lama de alto forno (MALARD, 2009). Com isso, a incorporação da lama de alto forno na massa cerâmica torna-se uma alternativa de utilização e inertização do resíduo, além de promover economia energética na queima.

2.6.3 Resíduo da massa cerâmica crua na massa cerâmica

O resíduo da massa cerâmica crua é gerado na própria indústria cerâmica durante a etapa de conformação das peças. Grande parte da massa cerâmica crua é desperdiçada durante o processo e requer seu reaproveitamento para diminuir o impacto ambiental e o custo financeiro envolvidos. Na revisão de literatura não foram encontrados estudos de aproveitamento deste resíduo na própria massa cerâmica. Apenas existem trabalhos de utilização do “chamote”, resíduo de cerâmica já queimada (VIEIRA, 2005; GOUVEIA; SPOSTO, 2009; REDIVO, 2011; FASTOFSKI et al., 2014).

2.6.4 Discussão dos estudos

Verifica-se com o levantamento feito, que o resíduo de beneficiamento de granito tem sido bastante pesquisado em misturas argilosas, já a lama de alto forno foi testada em pequenos teores, ambos resíduos tem melhorado algumas propriedades dos produtos cerâmicos. Também não foram encontrados estudos sobre a incorporação simultânea de resíduo de beneficiamento de granito e de lama de alto forno em massa cerâmica.

Quanto ao resíduo de massa cerâmica crua incorporado à massa argilosa, não há trabalhos desenvolvidos até o momento. Com isso, a proposta do trabalho é estudar a incorporação simultânea dos três resíduos em questão na massa argilosa para fabricar telhas cerâmicas que atendam às normas.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Argilas

A massa cerâmica estudada nesta pesquisa é composta de 4 argilas denominadas: argila “Batinga”, proveniente da cidade de Batinga-MG; argila “Berta”, oriunda do bairro Colúmbia no município de Colatina-ES; argila “Guandu” do município de Baixo Guandu-ES e argila “Itapina” da cidade de Itapina-ES.

As argilas não passam por nenhum tipo de beneficiamento antes da utilização e pertencem ao estoque da fábrica de cerâmica CINCO situada em Colatina-ES. A empresa produz telhas e blocos cerâmicos furados destinados ao mercado interno brasileiro, a produção mensal é de cerca de 1 milhão de telhas e de 300 mil blocos.

3.1.2 Resíduo de beneficiamento de granito (RBG)

O resíduo de beneficiamento de granito, denominado de RBG neste trabalho, é proveniente de empresa GRD – Granitos Rio Doce, beneficiadora de granito, situada em Barbados-Colatina-ES, a qual gera cerca de 250m³ por mês de resíduo no corte de blocos em 5 teares de lâminas metálicas e no polimento das chapas.

3.1.3 Lama de alto forno (LAF)

O presente trabalho usa a lama de alto forno, designada por LAF, gerada na produção do aço da empresa siderúrgica Arcelor Mittal, localizada em Serra-ES.

3.1.4 Resíduo de massa cerâmica crua (RMCC)

O resíduo de massa cerâmica crua, denominado de RMCC, é proveniente do processo de fabricação de telhas e blocos furados da empresa CINCO-ES. O resíduo é constituído por massa cerâmica composta das argilas Batinga, Berta, Guandu e Itapina, resíduo de beneficiamento de granito, lama de alto forno e o próprio resíduo de massa cerâmica crua.

3.2 Métodos

A metodologia usada apresenta o programa experimental dividido em 5 etapas:

- amostragem; caracterização física e determinação dos limites de Atterberg, análises química e mineralógica; análise do comportamento térmico; análise microestrutural por imagens do microscópio eletrônico de varredura (MEV) e do microscópio estereoscópico; além da avaliação das propriedades cerâmicas e mecânicas das matérias-primas;
- estudo da incorporação de cada resíduo em cada argila com a análise das propriedades cerâmicas e mecânicas;
- estudo da incorporação de cada resíduo na massa argilosa com a análise das propriedades cerâmicas e mecânicas;
- estudo da incorporação simultânea do RBG, LAF e RMCC na massa argilosa por meio da avaliação das propriedades cerâmicas e mecânicas e da análise microestrutural;
- produção em escala industrial de telha cerâmica com incorporação do máximo teor de resíduos na massa argilosa para atender às normas da ABNT.

3.2.1 Coleta e preparação das amostras

A coleta das argilas e dos resíduos foi feita em quatro pontos de amostragem em três seções (do topo, do meio e da base) nas pilhas de armazenagem com auxílio de pá em empresa cerâmica situada em Colatina-ES, seguindo a NBR 10007/2004.

As matérias-primas coletadas, foram identificadas, acondicionadas em sacolas e transportadas para o laboratório de materiais de construção do Ifes-Campus Colatina, onde foram secas ao ar, quarteadas, homogeneizadas, passadas na peneira nº 4 ABNT (com abertura de malha de 4,8 mm) e destorreadas com almofariz. A partir daí, parte das amostras foi preparada para os ensaios de caracterização seguindo a NBR 6457/1986. Os ensaios de caracterização foram realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) Campus Colatina, do Ifes Campus Vitória e do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) do Rio Grande do Sul (RS).

Parte das amostras foi destinada a conformação de corpos de prova cerâmicos. Detalhes da coleta e preparação das matérias-primas são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Matérias-primas – coleta e preparação



Fonte: Autora (2013)

3.2.2 Caracterização das matérias-primas

3.2.2.1 Caracterização ambiental dos resíduos

O método de análise da amostra foi o SM - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22th edition 2012. Os ensaios foram feitos no Laboratório de Meio Ambiente do SENAI-RS. A classificação ambiental dos 3 resíduos foi feita adotando-se como referência a NBR 10005/2004 – Lixiviação e a NBR 10006/2004 – Solubilização. E a partir daí, foram classificados de acordo com a NBR 10004/2004.

3.2.2.2 Caracterização física das matérias-primas

A caracterização física foi feita no Ifes - Campus Colatina com as determinações de: limite de liquidez (NBR 6459/1984); limite de plasticidade (NBR 7180/1984) e massa unitária no estado solto (NBR NM 45/2006). A análise da distribuição de tamanho de partícula foi realizada por difração de raio laser em equipamento Mastersizer 2000 da Malvern, com faixa de tamanho de partícula entre 0,02 µm e 2000 µm no PMT/EPUSP.

3.2.2.3 Análise química das matérias-primas

A análise química foi feita por fluorescência de raios X (FRX) em espectrômetro por

fluorescência de raios X marca Philips modelo PW2400 por dispersão de comprimento de onda (WDXRF) no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) do Senai-RS.

3.2.2.4 Análise mineralógica das matérias-primas

A análise mineralógica foi feita através do difratograma de raios X (DRX) das amostras, obtido pelo método do pó, em aparelho Philips X-PERT MPD, nas seguintes condições de operação: fonte de cobre (radiação K α), velocidade de varredura de 0,02° (2 θ) por passo com tempo de contagem de 1 segundo por passo no PMT/EPUSP. A identificação das amostras foi feita por comparação com arquivos do padrão Crystallographic Open Database – COD (COD, 2015).

3.2.2.5 Análise do comportamento térmico das matérias-primas

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) e termogravimetria (TG) foram feitas em aparelho Netzscht STA 449F3, com taxa de aquecimento de 10°C/minuto, da temperatura ambiente até 1200°C (atmosfera de argônio). O padrão usado foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado até 1500°C. Os ensaios foram realizados no Ifes – Campus Vitória.

3.2.2.6 Microscopia óptica das matérias-primas

As imagens de microscopia óptica foram obtidas a partir de amostras secas e queimadas a 850°C, em microscópio óptico estereoscópico marca ZEISS Axio Cam Erc5s Stemi 2000-C no Laboratório de Matérias-Primas Não-Metálicas Professor Péricio de Souza Santos (LPSS) do PMT/EPUSP.

3.2.2.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das matérias-primas

As imagens de MEV foram obtidas a partir de amostras secas e queimadas a 850°C, em microscópio eletrônico de varredura marca Philips XL-30, acoplado com Microssonda EDAX para análise espectrométrica de Raios X com detector de elementos leves no PMT/EPUSP. As amostras foram cobertas por um filme de ouro e metalizadas em aparelho metalizador a vácuo Baltec modelo SCD 050.

3.2.2.8 Poder calorífico da lama de alto forno

O poder calorífico foi determinado de acordo com as normas ASTM (American Society for Testing Materials) nº D 407-44 e D 240-57 T, que são recomendadas pela ABNT, no Departamento de Engenharia Química da EPUSP.

3.2.3 Estudo de incorporação dos resíduos na massa argilosa

Os estudos da dosagem para incorporação dos três resíduos na massa argilosa foi iniciado com o acompanhamento da produção de telhas cerâmicas em fábrica de cerâmica vermelha situada em Colatina-ES. Verificou-se que a dosagem das matérias-primas na fábrica é feita de forma empírica e com medições em volume.

Tal fato é observado na maioria das fábricas de cerâmica vermelha brasileiras, as quais utilizam procedimentos empíricos para escolha e dosagem da matéria-prima argilosa, que podem resultar em não atendimento das propriedades cerâmicas estabelecidas para os produtos fabricados. A região do estudo, Colatina, se destaca no ES como polo produtor de cerâmica vermelha possuindo várias empresas.

A massa cerâmica usada na fábrica e adotada como referência na pesquisa é composta por 62% (em massa) de massa argilosa (Batinga + Berta + Guandu + Itapina) e 38% (em massa) de resíduos (resíduo de beneficiamento de granito + lama de alto forno + resíduo de massa cerâmica crua).

A partir dos dados e informações obtidos, foram propostas 3 etapas para o estudo de incorporação dos três resíduos na massa argilosa:

- a) 1^a etapa: conformação de corpos de prova de cada argila com incorporação de cada resíduo nos teores de 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% (massa);
- b) 2^a etapa: conformação de corpos de prova da massa argilosa com incorporação de cada resíduo nos teores de 0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% (massa);
- c) 3^a etapa: conformação de corpos de prova da massa argilosa com a incorporação simultânea dos três resíduos, com o teor inicial de 38% (massa) de resíduos praticado na fábrica.

O estudo da viabilidade técnica da massa argilosa com incorporação dos resíduos

foi feita através da avaliação das propriedades cerâmicas e mecânicas nos corpos de prova secos e queimados. A avaliação da resistência mecânica dos corpos de prova foi feita pelo Método estatístico Weibull (WEIBULL, 1939).

3.2.4 Conformação dos corpos de prova

Segundo Souza Santos (1975), a avaliação das propriedades cerâmicas no estado cru e após queima podem ser determinadas em massa cerâmica conformada manualmente, prensada e extrusada.

Nesta pesquisa foram conformados corpos de prova esféricos (esferas moldadas manualmente) e prismáticos (barras prensadas). Na 1^a e 2^a etapas do estudo de incorporação dos três resíduos na massa argilosa foram conformadas esferas. Na 3^a etapa do estudo de incorporação e na caracterização das matérias-primas foram conformadas esferas e barras.

A conformação das esferas foi feita seguindo a metodologia desenvolvida no LPSS do PMT/EPUSP pelo professor Francisco Rolando Valenzuela Diaz. Segundo Miyahara et al. (2004), a conformação das esferas é um procedimento rápido e de baixo custo para estudo inicial do potencial cerâmico de matérias-primas para uso na indústria cerâmica. Nesse sentido foram conformadas esferas em todas as etapas do estudo por se tratar de uma metodologia mais acessível nas olarias em estudos iniciais de dosagem.

Para conformação das esferas, as matérias-primas foram passadas na peneira ABNT nº 40 (abertura de malha 0,42 mm). Foram medidos 10 g de material seco e sobre ele foi borrifada água suficiente para mistura com auxílio de espátula em cadiño de porcelana até se conseguir conformar manualmente a esfera de diâmetro médio de 2 cm. Após a conformação da esfera foi medida a massa úmida e o diâmetro da esfera (com paquímetro) em 3 pontos pré determinados para posterior cálculo da média das 3 determinações. As esferas foram identificadas delicadamente com auxílio de uma agulha em até 24 h após moldagem e foram mantidas em temperatura ambiente por 48 h em bandejas metálicas cobertas com papel sulfite.

Nas barras, a metodologia seguiu a proposta de Souza Santos (1975). A peneira usada foi a ABNT nº 80 (abertura de malha 0,18 mm). Foram medidos 10 g de material seco, foram adicionados 10% de água e feita a mistura. As barras foram

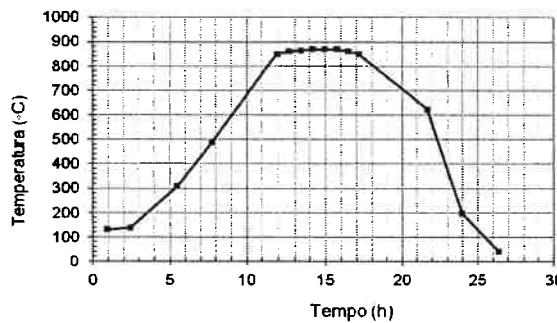
confeccionadas em moldes metálicos com dimensões de 6,0 cm x 2,0 cm x 0,5 cm. Após isso, o material no molde foi prensado em prensa uniaxial de 15 t sob carga de 3 t (250 kgf/cm^2). Foram determinadas massa úmida e medidas de comprimento, largura e espessura (com paquímetro). As barras foram identificadas delicadamente com auxílio de uma agulha logo após prensagem e ficaram em temperatura ambiente por 48 h em bandejas metálicas cobertas com papel sulfite.

Foram feitos para cada dosagem: 6 corpos de prova na 1^a etapa, 6 corpos de prova na 2^a etapa e 16 corpos de prova na 3^a etapa. Os corpos de prova foram levados à estufa a 110°C por 24 h. Após a secagem foram determinadas massa seca, dimensões e perda de massa. Foram reservados 3 corpos de prova da 1^a etapa e da 2^a etapa e 8 corpos de prova da 3^a etapa para medida da resistência mecânica após secagem.

O restante dos corpos de prova foi queimado na indústria cerâmica para simular as condições reais de produção. Foi utilizado o forno contínuo tipo túnel, que possui 140 m de comprimento (dotado de zonas de pré-aquecimento, queima e resfriamento) que atinge na zona de queima uma temperatura de cerca de 850°C por cerca de 5 h em ciclo de queima de cerca de 26 h. O combustível utilizado no forno é a madeira.

O gráfico da Figura 7 ilustra a taxa de variação da temperatura do forno industrial em relação ao tempo de queima.

Figura 7 – Gráfico da variação da temperatura do forno da fábrica de cerâmica em relação ao tempo de queima



Fonte: Autora (2015)

A Figura 8 apresenta alguns exemplares dos corpos de prova e uma vista lateral do forno da fábrica na região da zona de queima.

Figura 8 – Exemplares dos corpos de prova e forno industrial usado para queima



(a) Barras após conformação

(b) Zona de queima do forno

(c) Esferas após queima

Fonte: Autora (2014)

3.2.5 Propriedades cerâmicas e mecânicas dos corpos de prova

Após a queima dos corpos de prova foram medidas a massa e as dimensões, e verificado o aspecto visual. As propriedades cerâmicas e mecânicas avaliadas nos corpos de prova conformados para caracterização das matérias-primas e para os estudos de incorporação dos resíduos foram: absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, massa específica aparente da parte sólida e perda ao fogo. A retração volumétrica e a resistência à compressão após secagem e após queima (em prensa hidráulica marca MARCON MPH-15 15 t) foram medidas nas esferas. Nas barras foram medidas retração linear e tensão de ruptura à flexão após secagem e após queima (em máquina universal EMIC DL 30000). A seguir são descritas as propriedades cerâmicas e mecânicas avaliadas nos corpos de prova.

3.2.5.1 Absorção de água e porosidade aparente

Para determinação da absorção de água e da porosidade aparente, os corpos de prova foram secos em estufa a 110°C por 24 h e a massa seca (m_s) foi medida. Após imersão dos corpos de prova em água por 24 h, foram medidas na balança hidrostática, a massa imersa (m_i) e a massa úmida (m_u) dos corpos de prova. A absorção de água é obtida pela equação 1 (SOUZA SANTOS, 1975, p.196).

$$\text{AA} (\%) = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

onde: AA= absorção de água (%); m_u = massa do corpo de prova úmido (g); m_s = massa do corpo de prova após secagem (g).

A porosidade aparente é obtida pela equação 2 (SOUZA SANTOS, 1975, p.196).

$$\text{PA} (\%) = \frac{(m_u - m_s) \times 100}{(m_u - m_i)} \quad (2)$$

onde: PA= porosidade aparente (%); m_u = massa do corpo de prova úmido (g); m_s = massa do corpo de prova após secagem (g); m_i =massa do corpo de prova imerso em água (g).

3.2.5.2 Massa específica aparente (MEA)

A massa específica aparente é o resultado da relação entre a massa do corpo de prova seco a 110°C e o seu volume aparente, levando-se em conta os poros abertos existentes no sólido. É calculada com a equação 3 (SOUZA SANTOS, 1975, p.197).

$$\text{MEA (g/cm}^3\text{)} = \frac{m_s}{(m_u - m_i)} \quad (3)$$

onde: MEA= massa específica aparente (g/cm^3); m_s = massa do corpo de prova após secagem (g); m_u = massa do corpo de prova úmido (g); m_i = massa do corpo de prova imerso em água (g); $(m_u - m_i)$ = volume aparente.

3.2.5.3 Massa específica aparente da parte sólida (MEAS)

A massa específica aparente da parte sólida é o resultado da relação entre a massa do corpo de prova seco a 110°C e o seu volume sólido aparente, sendo descontados os poros abertos existentes no sólido. É calculada com a equação 4 (SOUZA SANTOS, 1975, p. 197).

$$\text{MEAS (g/cm}^3\text{)} = \frac{m_s}{(m_s - m_i)} \quad (4)$$

onde: MEAS= massa específica aparente da parte sólida (g/cm^3); m_s = massa do corpo de prova após secagem (g); m_i = massa do corpo de prova imerso em água (g); $(m_s - m_i)$ = volume sólido aparente.

3.2.5.4 Perda de massa

A perda de massa pode ocorrer após a secagem e após a queima. Sendo que, a perda de massa após secagem a 110°C (PS) é obtida pela equação 5.

$$\text{PS} (\%) = \frac{(m_u - m_s) \times 100}{m_u} \quad (5)$$

onde: PS= perda de massa após secagem (%); m_u = massa do corpo de prova após moldagem (g); m_s = massa do corpo de prova após secagem (g).

A perda de massa após a queima (PF) em uma determinada temperatura é obtida pela equação 6.

$$\text{PF} (\%) = \frac{(m_s - m_Q) \times 100}{m_s} \quad (6)$$

onde: PF= perda de massa após queima (%); m_Q = massa do corpo de prova após queima (g); m_s = massa do corpo de prova após secagem (g).

3.2.5.5 Retração volumétrica das esferas

A retração volumétrica após secagem a 110°C (Equação 7) é calculada por meio da diferença do volume apresentado pelas esferas na moldagem e após secagem.

$$\text{RV}_s(\%) = \frac{(r_u^3 - r_s^3) \times 100}{r_u^3} \quad (7)$$

onde: RV_s = retração volumétrica após secagem (%); r_u = média de 3 determinações do raio da esfera após conformação (mm); r_s = média de 3 determinações do raio da esfera após secagem (mm).

A retração volumétrica após queima (Equação 8) em determinada temperatura é calculada através de diferença do volume apresentado pelas esferas após secagem e após queima.

$$\text{RV}_Q(\%) = \frac{(r_s^3 - r_Q^3) \times 100}{r_s^3} \quad (8)$$

onde: RV_Q = retração volumétrica após queima (%); r_s = média de 3 determinações do raio da esfera após secagem (mm); r_Q = média de 3 determinações do raio da esfera após queima (mm).

3.2.5.6 Retração linear das barras

A retração linear após secagem a 110°C (RLs) é obtida pela equação 9 (SOUZA SANTOS, 1975, p.194):

$$RL_s (\%) = \frac{(L_u - L_s) \times 100}{L_u} \quad (9)$$

L_u

onde: RL_s = retração linear após secagem (%); L_u = comprimento do corpo de prova após prensagem (mm); L_s = comprimento do corpo de prova após secagem (mm).

A retração linear de queima (RL_Q) em determinada temperatura é obtida pela equação 10 (SOUZA SANTOS, 1975, p.194):

$$RL_Q (\%) = \frac{(L_s - L_Q) \times 100}{L_s} \quad (10)$$

L_s

onde: RL_Q = retração linear após queima (%); L_Q = comprimento do corpo de prova após queima (mm); L_s = comprimento do corpo de prova após secagem (mm).

3.2.5.7 Tensão de ruptura à flexão a 3 pontos das barras

A tensão de ruptura à flexão a 3 pontos é calculada através da equação 11 (SOUZA SANTOS, 1975, p.195).

$$TR (\text{MPa}) = \frac{3 P L}{2 b h^2} \quad (11)$$

onde: TR = tensão de ruptura à flexão (MPa); P = carga de ruptura (N); L = distância entre os apoios da barra (mm); b = largura da barra (mm); h = espessura barra (mm).

3.2.5.8 Resistência à compressão das esferas

A resistência à compressão é calculada de acordo com a equação 12.

$$\sigma (\text{MPa}) = \frac{F}{\pi R^2} \quad (12)$$

onde: σ = resistência à compressão (MPa); F = carga de ruptura (N); R = raio médio da esfera (mm).

3.2.6 Análise microestrutural da massa cerâmica final

A partir dos resultados obtidos no estudo de incorporação dos resíduos foi adotada como “massa cerâmica final”, a mistura que obteve melhor desempenho nas propriedades cerâmicas e mecânicas avaliadas (em especial na resistência

mecânica, absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente) levando em consideração o máximo teor de incorporação dos resíduos. A análise microestrutural foi realizada com DRX e MEV em barras e esferas conformadas com a massa cerâmica final no Ifes - *Campus Vitória*.

A curva do DRX foi obtida pelo método do pó, em aparelho Philips X-PERT MPD, nas seguintes condições de operação: fonte de cobre (radiação K α), velocidade de varredura de 0,02° (2θ) por passo com tempo de contagem de 1 segundo por passo. A identificação das amostras analisadas foi feita por comparação com arquivos do padrão Crystallographic Open Database – COD.

As imagens de MEV foram obtidas a partir de corpos de prova, secos a 110°C e queimados a 850°C, na região de fratura, em esferas e barras, em microscópio eletrônico de varredura marca Zeizz EVO MA-10, acoplado com Microssonda Oxford X-MAXⁿ-20 para EDS. As amostras foram cobertas com um filme de ouro e metalizadas em aparelho metalizador a vácuo Quorum modelo Q150R ES. A espectrometria de energia dispersiva (EDS) foi feita em 3 pontos distintos. Foi efetuado também o mapeamento dos elementos encontrados nas imagens.

3.2.7 Limites de consistência da massa cerâmica final

A determinação do limite de plasticidade (LP) é de extrema importância no processo de fabricação das peças cerâmicas, sendo este o valor mínimo de água de conformação para não causar aumento em porosidade, retração e custo da secagem. Foram determinados limite de liquidez (NBR 6459/1984) e limite de plasticidade (NBR 7180/1984) no Ifes – *Campus Colatina*; e calculado o índice de plasticidade da massa cerâmica final para se traçar um prognóstico da extrusão das telhas cerâmicas.

3.2.8 Análise estatística Weibull

Os materiais cerâmicos apresentam uma série de defeitos que podem atuar como concentradores de tensão e que determinam os pontos onde se inicia a fratura das peças. A resistência mecânica do material cerâmico depende da sua microestrutura e da distribuição e tamanho dos defeitos presentes, os quais são aleatórios e geram uma dispersão nos valores de resistência que deve ser considerada. A medida da dispersão é obtida por meio da distribuição de Weibull proposta por Weibull (1939).

Foram conformadas e queimadas 30 esferas e 30 barras com a massa cerâmica final. A partir dos resultados obtidos de resistência mecânica dos corpos de prova foi feita a análise estatística de Weibull, que fornece dois parâmetros: o módulo de Weibull (m), que mede a dispersão dos resultados e a resistência característica (σ_0), que é o valor de resistência mecânica para qual a probabilidade de fratura corresponde a 63,2%.

A equação de Weibull (Equação 13) relaciona a probabilidade de fratura (Equação 14) de uma peça com a tensão (σ) a que ela está submetida:

$$F(V) = 1 - P(V) = 1 - \exp[-((\sigma - \sigma_u)/\sigma_0)^m] \rightarrow \ln(\ln(1/(1-F(V))) = m (\ln \sigma - \ln \sigma_0) \quad (13)$$

$$F(V) = N / (n + 1) \quad (14)$$

onde: $F(V)$ = probabilidade de fratura; $P(V)$ = probabilidade de sobrevivência; σ = resistência mecânica do corpo de prova na ruptura (MPa); σ_u = resistência mecânica acima da qual a probabilidade de fratura é zero (MPa); σ_0 = resistência mecânica característica (média) do corpo de prova (MPa); m = módulo de Weibull (declividade da reta); N = número do ensaio (de 1 a n); n = número de corpos de prova testados (neste caso $n= 30$). A partir daí, foram traçados gráficos, $\ln(\ln(1/(1-F(V)))$ versus $\ln \sigma$, onde "F" é a probabilidade estimada e " σ " é a resistência mecânica na ruptura para determinação do módulo de Weibull e da resistência mecânica característica.

3.2.9 Produção das telhas cerâmicas em escala industrial

Com a massa cerâmica final, adotada a partir dos resultados do estudo de incorporação dos resíduos, foram produzidas telhas cerâmicas dos tipos americana, portuguesa e romana em escala industrial.

A produção das telhas seguiu o processo usual de fabricação da indústria cerâmica, iniciando com a dosagem em volume no pátio da empresa e mistura das 7 matérias-primas com auxílio da pá carregadeira, passagem pelo caixão dosador, laminador, maromba e repouso da mistura mínimo de 3 dias. Após isso, as telhas foram extrusadas e prensadas com a massa cerâmica final, secas e queimadas a temperatura de 850°C no forno contínuo tipo túnel. Foram produzidas cerca de 16 mil telhas. A Figura 9 apresenta algumas das etapas de produção e exemplares das telhas.

Figura 9 – Etapas da fabricação e exemplares das telhas produzidas



Fonte: Autora (2014)

3.2.10 Propriedades das telhas cerâmicas produzidas em escala industrial

As telhas cerâmicas produzidas em escala industrial foram submetidas a avaliação de suas propriedades seguindo metodologia da NBR 15310/2005, em amostra formada por 6 corpos de prova por amostragem conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades e limites da norma NBR 15310/2005

Propriedades	NBR 15310/2005	Limites
Características geométricas dimensionais	Anexo A	L, C, Lp – tolerância $\pm 2\%$ Rm – tolerância $\pm 1\%$ Telha prensada – Hp = 7 mm
Planaridade e retilineidade	Anexo A	Planaridade ≤ 5 mm Retilineidade $\leq 1\%$ do comprimento efetivo
Impermeabilidade	Anexo B	Não apresentar vazamento, formação de gotas na face inferior É tolerado aparecimento de manchas de umidade
Carga de ruptura a flexão	Anexo C*	Telha romana de encaixe ≥ 1300 N Demais telha ≥ 1000 N
Absorção de água	Anexo D	Máximo de 20%
Massa	Anexo D	Tolerância máxima 6%

Nota: L=largura; C=comprimento; Lp=posição do pino ou furo de amarração; Hp=altura mínima do pino; *amostragem dupla (12 corpos de prova)

Alguns detalhes dos ensaios realizados são apresentados na Figura 10.

Figura 10 – Detalhes dos ensaios realizados nas telhas



(a) Absorção de água

(b) Carga de ruptura à flexão

(c) Retilíneidade com deflectômetro

Fonte: Autora (2015)

3.2.11 Caracterização ambiental da massa cerâmica final e das telhas produzidas

Aliada ao estudo de viabilidade técnica da incorporação dos resíduos, foi feita a análise ambiental da massa cerâmica final e da telha produzida em escala industrial para avaliação das possíveis consequências que podem gerar ao meio ambiente e à saúde humana.

A telha triturada e a massa cerâmica final foram passadas na peneira ABNT nº 3/8" (com abertura de malha de 9,5 mm) para serem submetidas a caracterização ambiental.

O método de análise da amostra foi o SM - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22th edition 2012. As amostras foram classificadas ambientalmente de acordo com a NBR 10004/2004 com os resultados obtidos nos testes da NBR 10005/2004 – Lixiviação e da NBR 10006/2004 – Solubilização. A análise dos extratos lixiviado e solubilizado foi feita pelo Laboratório de Meio Ambiente do SENAI-RS.

4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos na caracterização das matérias-primas, nos ensaios desenvolvidos nas barras e esferas e nas telhas produzidas.

4.1 Caracterização das matérias-primas

4.1.1 Caracterização ambiental dos resíduos

Inicialmente foi feita a caracterização ambiental dos resíduos para se comprovar que a utilização dos mesmos não resultaria em perigo para o meio ambiente e para a saúde pública. Os resultados dos ensaios de solubilização e lixiviação dos três resíduos e os limites máximos permitidos da NBR 10004/2004 para extrato solubilizado (Anexo G) e para extrato lixiviado (Anexo F) são apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4.

4.1.1.1 Caracterização ambiental do RBG

A Tabela 2 apresenta o resultado da caracterização ambiental do RBG, que foi classificado como **NÃO PERIGOSO** (Classe II) e **INERTE** (B), ou seja, **Classe II-B**. O pH medido atingiu 8,77, caracterizando o RBG como “**não corrosivo**”, pois esse valor de pH se situou no intervalo entre 2 e 12,5 (NBR 10004/2004).

Tabela 2 – Análise ambiental do resíduo de beneficiamento de granito (RBG)

(continua)

Parâmetros analisados	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato solubilizado (mg/L)	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato lixiviado (mg/L)
Alumínio	0,11	0,2	-	-
Arsênio	<0,0025	0,01	<0,0025	1,0
Bário	<0,10	0,7	0,53	70,0
Cádmio	<0,0005	0,005	<0,05	0,5
Chumbo	<0,005	0,01	<0,10	1,0
Cianeto	<0,005	0,07	-	-
Cloreto	49,76	250,0	-	-
Cobre	<0,10	2,0	-	-
Cromo total	<0,05	0,05	<0,05	5,0
Fenóis totais	<0,002	0,01	-	-

(conclusão)

Parâmetros analisados	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato solubilizado (mg/L)	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato lixiviado (mg/L)
Ferro	<0,13	0,3	-	-
Fluoreto	0,75	1,5	<0,10	150
Manganês	<0,10	0,1	-	-
Mercúrio	<0,001	0,001	<0,001	0,1
Nitrato	<0,50	10,0	-	-
Prata	<0,05	0,05	<0,05	5,0
Selênio	<0,0025	0,01	<0,0025	1,0
Sódio	63,54	200	-	-
Sulfato	127,85	250	-	-
Surfactantes	0,23	0,5	-	-
Zinco	0,06	5,0	-	-
pH	8,77	-	-	-

4.1.1.2 Caracterização ambiental da LAF

A Tabela 3 apresenta o resultado da caracterização ambiental na LAF. Observou-se no extrato solubilizado que as concentrações de ferro, fluoreto e sulfato foram superiores aos limites definidos no Anexo G (NBR 10004/2004), portanto, o resíduo foi classificado como **NÃO PERIGOSO** (Classe II) e **NÃO INERTE** (A), ou seja, **Classe II-A**. O pH medido atingiu 8,33, caracterizando a LAF como “não corrosiva”, pois esse valor de pH se situou no intervalo entre 2 e 12,5 (NBR 10004/2004).

Tabela 3 – Análise ambiental da lama de alto forno (LAF)

(continua)

Parâmetros analisados	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato solubilizado (mg/L)	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato lixiviado (mg/L)
Alumínio	0,15	0,2	-	-
Arsênio	<0,0025	0,01	<0,0025	1,0
Bário	<0,10	0,7	0,55	70,0
Cádmio	<0,0005	0,005	<0,05	0,5
Chumbo	<0,005	0,01	0,15	1,0
Cianeto	0,050	0,07	-	-
Cloreto	64,18	250,0	-	-
Cobre	<0,10	2,0	-	-
Cromo total	<0,05	0,05	<0,05	5,0

(conclusão)

Parâmetros analisados	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato solubilizado (mg/L)	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato lixiviado (mg/L)
Fenóis totais	<0,002	0,01	-	-
Ferro	0,37	0,3	-	-
Fluoreto	2,97	1,5	0,39	150
Manganês	<0,10	0,1	-	-
Mercúrio	<0,001	0,001	<0,001	0,1
Nitrato	2,61	10,0	-	-
Prata	<0,05	0,05	<0,05	5,0
Selênio	0,005	0,01	<0,003	1,0
Sódio	45,79	200	-	-
Sulfato	898,82	250	-	-
Surfactantes	0,22	0,5	-	-
Zinco	0,10	5,0	-	-
pH	8,33	-	-	-

4.1.1.3 Caracterização ambiental do RMCC

A Tabela 4 apresenta o resultado da caracterização ambiental no resíduo de massa cerâmica crua. Observou-se no extrato solubilizado que a concentração de fluoreto foi superior ao limite definido no Anexo G (NBR 10004/2004), portanto, o resíduo foi classificado como **NÃO PERIGOSO** (Classe II) e **NÃO INERTE** (A), ou seja, **Classe II-A**. O pH medido atingiu 8,31, caracterizando o RMCC como “não corrosivo”, pois esse valor de pH se situou no intervalo entre 2 e 12,5 (NBR 10004/2004).

Tabela 4 – Análise ambiental do resíduo de massa cerâmica crua (RMCC)

(continua)

Parâmetros analisados	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato solubilizado (mg/L)	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato lixiviado (mg/L)
Alumínio	0,10	0,2	-	-
Arsênio	<0,0025	0,01	<0,0025	1,0
Bário	<0,15	0,7	1,16	70,0
Cádmio	<0,0005	0,005	<0,05	0,5
Chumbo	<0,005	0,01	<0,10	1,0
Cianeto	0,011	0,07	-	-
Cloreto	30,57	250,0	-	-
Cobre	<0,10	2,0	-	-

Parâmetros analisados	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato solubilizado (mg/L)	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato lixiviado (mg/L)	(conclusão)
Cromo total	<0,05	0,05	<0,05	5,0	
Fenóis totais	<0,002	0,01	-	-	
Ferro	<0,13	0,3	-	-	
Fluoreto	1,60	1,5	<0,10	150	
Manganês	<0,10	0,1	-	-	
Mercúrio	<0,001	0,001	<0,001	0,1	
Nitrato	<0,50	10,0	-	-	
Prata	<0,05	0,05	<0,05	5,0	
Selênio	0,003	0,01	<0,0025	1,0	
Sódio	26,33	200	-	-	
Sulfato	130,83	250	-	-	
Surfactantes	0,24	0,5	-	-	
Zinco	0,07	5,0	-	-	
pH	8,31	-	-	-	

Com os resultados da caracterização ambiental pode-se dizer que os resíduos em questão não são perigosos. Assim, o estudo de incorporação simultânea dos três resíduos na massa argilosa foi considerado viável do ponto de vista ambiental.

4.1.2 Caracterização física das matérias-primas

A Tabela 5 apresenta os resultados de limites de Atterberg, análise granulométrica e massa unitária das matérias-primas.

As argilas usadas na fabricação das telhas devem apresentar plasticidade adequada para extrusão e prensagem. O índice de plasticidade (IP) indica a faixa de consistência plástica das argilas e é calculado pela diferença entre o limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). O limite de plasticidade (LP) indica a quantidade mínima de água para se alcançar a consistência plástica, e o limite de liquidez (LL) representa quantidade de água que ultrapassa essa faixa. Os fatores responsáveis por elevar a plasticidade nas argilas são o alto teor de matéria orgânica e a fina granulometria (SOUZA SANTOS, 1975), além da presença do argilomineral caulinita (AGUIAR, 2012).

Os limites de plasticidade (LP) das quatro argilas se situaram dentro da faixa de

variação de 8,9% a 56,3% para argilas cauliníticas especificado por Souza Santos (1975). Os índices de plasticidade (IP) obtidos das quatro argilas, com valores maiores que 15, indicam alta plasticidade (CAPUTO, 2011).

Foram feitas tentativas para determinar o limite de plasticidade do RBG, mas os experimentos foram impraticáveis, assim como no trabalho de Moreira, Freire e Holanda (2003). Portanto, o RBG é um material não plástico, que pode contribuir para se atingir a plasticidade ideal na extrusão, no caso de misturas argilosas muito plásticas.

O IP de 9,12% encontrado na LAF indica que ela é pouco plástica, pois seu IP se situou no intervalo entre 7 e 15 (CAPUTO, 2011). E de acordo com Vieira e Pinheiro (2011), valores de IP menores que 10 dificultam o processo de extrusão.

O RMCC apresentou limites de Atterberg similares aos encontrados nas argilas, o que é explicado em função das argilas constituírem 62% (massa) do RMCC.

Tabela 5 – Caracterização física das matérias-primas

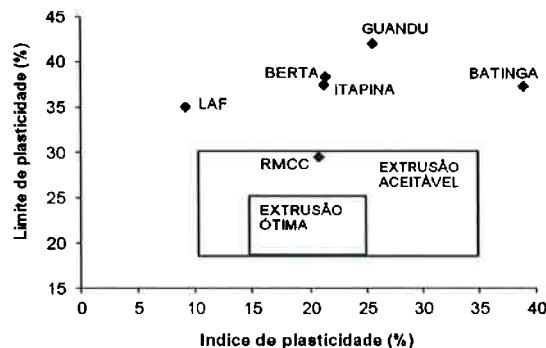
Características	Limites de Atterberg (%)			Composição granulométrica (%)			Cu	Massa unitária (Kg/dm³)
	LL	LP	IP	< 2µm	2-20µm	> 20 µm		
Argila Batinga	76,16	37,34	38,82	14	72	14	5	1,02
Argila Berta	58,62	37,50	21,12	7	48	45	7	1,03
Argila Guandu	67,46	42,00	25,46	11	62	27	8	1,05
Argila Itapina	59,61	38,37	21,24	7	55	38	7	1,11
RBG	28,07	n.d.	NP	10	50	40	9	0,99
RMCC	50,20	29,45	20,75	11	64	25	6	1,14
LAF	44,20	35,08	9,12	10	45	45	9	1,14

Nota: LL= limite de liquidez; LP= limite de plasticidade; IP= índice de plasticidade; Cu= coeficiente de uniformidade; n.d.= não foi possível determinar; NP=não plástico (material sem plasticidade)

Com o gráfico da Figura 11, que indica regiões de extrusão ótima e aceitável elaborado a partir dos limites de Atterberg, foi possível obter um prognóstico da etapa de conformação por extrusão das matérias-primas. Verifica-se que o RMCC se situou na zona de extrusão aceitável, enquanto todas as argilas localizaram-se fora dessa região, indicando que possuem excessiva plasticidade, especialmente a argila Batinga. A LAF também não foi considerada adequada para extrusão e se situou em

região de baixa plasticidade.

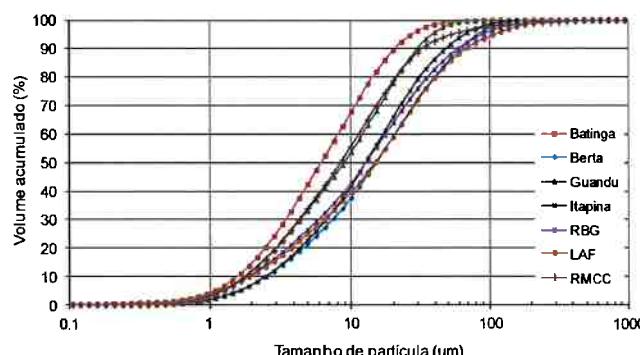
Figura 11 – Prognóstico de extrusão das matérias-primas



Fonte: Marsigli e Dondi (1997), p.222, adaptado

Na Tabela 5 e Figura 12, pode ser observado que a argila Batinga apresentou 72% de seu volume de grãos com tamanho entre 2 μm e 20 μm , diâmetro médio da amostra (d_{50}) de 7 μm , tanto o volume de grãos menores que 2 μm e maiores que 20 μm foi de 14%. A argila Berta apresentou 7% de grãos menores que 2 μm , o volume de grãos entre 2 μm e 20 μm foi de 48% e de grãos maiores que 20 μm de 45%, o diâmetro médio da amostra (d_{50}) foi de 17 μm . Na argila Guandu 11% de grãos são menores que 2 μm , 62% estão entre 2 μm e 20 μm e 27% são maiores que 20 μm , o valor de d_{50} é 10 μm . A argila Itapina apresentou 7% de grãos menores que 2 μm , 55% entre 2 μm e 20 μm e 38% maiores que 20 μm , o valor de d_{50} é 14 μm . O RBG tem 10% de grãos menores que 2 μm , 50% entre 2 μm e 20 μm e 40% maiores que 20 μm , o valor de d_{50} é 14 μm . O RMCC tem 11% de grãos menores que 2 μm , 64% entre 2 μm e 20 μm e 25% maiores que 20 μm , o valor de d_{50} é 10 μm . E a LAF tem 10% de grãos menores que 2 μm , tanto o volume de grãos entre 2 μm e 20 μm e maiores que 20 μm foi de 45%, o diâmetro médio (d_{50}) é 17 μm .

Figura 12 – Curvas de distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas



Fonte: Autora (2015)

A maior porcentagem de grãos das matérias-primas (45% na LAF a 72% na argila Batinga) ficou situada entre os tamanhos de 2 μm a 20 μm (faixa de tamanho de partículas associadas ao silte), o que pode sugerir presença de alta quantidade de quartzo nas argilas e no RBG. Nesta faixa de tamanho de partículas do silte, pode haver mineral argiloso que proporciona plasticidade (VIEIRA; SALES; MONTEIRO, 2004), como ocorre na faixa da “fração argila” (tamanho dos grãos menores que 2 μm). O fato das argilas terem apresentado alta plasticidade pode estar relacionado também à presença de matéria orgânica, já que a análise da distribuição de tamanho de partículas indicou que a “fração argila” é baixa.

O coeficiente de uniformidade ($C_u = d_{60}/d_{10}$), que representa a razão entre os tamanhos correspondentes a 60% e 10% do volume de grãos menores que eles, indicou que as matérias-primas possuem uniformidade média ($5 \leq C_u \leq 15$), de acordo com Caputo (2011), concordando com as curvas granulométricas obtidas. Com esses valores de C_u , grande parte dos grãos possui mesma faixa de tamanho, o que não facilita o empacotamento físico, o qual poderia contribuir no aumento da densificação nos corpos cerâmicos.

As matérias-primas apresentaram uma distribuição de tamanho de partículas entre uniforme (maioria dos grãos de dimensões similares) e contínua (variação nas dimensões dos grãos). A argila Batinga se aproximou da distribuição uniforme, enquanto a LAF, argila Berta, argila Itapina e RBG se aproximaram da distribuição contínua, seguidas da argila Guandu e do RMCC.

A massa unitária, relação entre a massa e o volume sem compactação dos grãos, foi obtida para os cálculos de dosagem das misturas argilosas com os resíduos em massa (para conformação de barras e esferas) e volume (para produção das telhas na fábrica).

4.1.3 Análise química por FRX das matérias-primas

A Tabela 6 mostra, em percentual em massa, a composição química das matérias-primas utilizadas.

Como pode ser observado, as quatro argilas são constituídas essencialmente de sílica e alumina, característica da matéria-prima de cerâmica vermelha com caráter refratário, indicando presença de caulinita e de quartzo, com valores dentro do

intervalo estipulado por Souza Santos (1975). Sendo para SiO_2 entre 43,2% e 77,6% e para o Al_2O_3 entre 6,8% e 38,0%; com exceção das argilas Batinga e Guandu, que apresentaram teores de SiO_2 , respectivamente, de 41,8% e 40,8%. As argilas não possuem natureza carbonática devido ao baixo teor de CaO (entre 0,16% e 0,24%).

Os altos teores de Fe_2O_3 conferem a cor avermelhada após a queima, característica dos produtos de cerâmica vermelha. A perda ao fogo apresentada pelas argilas se situou próximo ao limite máximo do intervalo de 6,0% a 15,7% específico para argila caulinitica (SOUZA SANTOS, 1975). Esta perda ao fogo relativamente alta apresentada pelas argilas está associada à desidroxilação dos argilominerais (caulinita) e à oxidação de matéria orgânica (DIAS, 2011) e pode ocasionar elevada porosidade nas peças cerâmicas após queima (VIEIRA; PEÇANHA; MONTEIRO, 2003; VIEIRA; PINHEIRO, 2011).

Os óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O) contribuem pouco na formação da fase líquida em função dos baixos teores apresentados em todas as argilas. Segundo Prado (2011), a presença da caulinita nas argilas pode ser confirmada através dos baixos teores dos óxidos alcalinos e das altas concentrações de SiO_2 e Al_2O_3 obtidos.

Quanto a análise química do RBG, foi observado que é constituído predominantemente por sílica e alumina, evidenciando ser um material sílico-aluminoso. A quantidade significativa de SiO_2 está associada com a fase cristalina do quartzo. A presença dos óxidos alcalinos Na_2O e K_2O pode contribuir na queima das peças cerâmicas por serem óxidos fundentes. A presença de Fe_2O_3 está associada com a granalha de aço, assim como o CaO está associado com a cal, ambos usados no resíduo. O RBG apresentou baixo valor de perda ao fogo em relação às argilas, o que pode resultar em diminuição da retração linear de queima e da porosidade.

Conforme a Tabela 6, a LAF apresentou elevado teor de óxido de ferro (61,16%), além de SiO_2 , CaO (usado como fundente no alto forno) e Al_2O_3 em menores teores. Apresentou elevado valor de perda ao fogo (25,92%) em relação às argilas devido a combustão dos finos de coque (usado como combustível no alto forno) presentes na lama, corroborando o valor encontrado em Vieira et al. (2007).

O RMCC apresentou valores similares aos encontrados na análise química das argilas para os principais óxidos. Verificou-se um aumento nos teores de CaO e nos

óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O) em função do RMCC conter o RBG em sua composição.

Tabela 6 – Composição em óxidos constituintes das matérias-primas (% em peso)

Constituintes	Argila Batinga	Argila Berta	Argila Guandu	Argila Itapina	RBG	RMCC	LAF
SiO_2	41,83	43,62	40,85	43,39	62,88	44,70	5,11
Al_2O_3	32,32	28,15	33,56	30,16	14,11	27,57	1,80
Fe_2O_3	8,76	12,04	7,41	9,29	5,72	8,96	61,16
TiO_2	1,35	1,34	1,51	1,39	0,67	1,22	0,09
K_2O	0,92	1,02	0,77	1,25	4,36	1,56	0,23
MgO	0,71	0,38	0,63	0,62	1,02	0,72	0,70
CaO	0,24	0,16	0,21	0,24	4,42	1,01	3,73
Na_2O	0,18	0,23	0,16	0,17	2,54	0,65	0,06
P_2O_5	0,07	0,23	0,14	0,12	0,38	0,16	0,13
MnO	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	0,07	0,06	0,27
BaO	0	0	0	0	0,22	0,26	0,31
ZnO	0	0	0	0	<0,1	0,22	0,44
Co_2O_3	0	0	0	0	<0,1	<0,1	<0,1
Cr_2O_3	0	0	0	0	<0,1	<0,1	<0,1
PbO	0	0	0	0	<0,1	<0,1	<0,1
SrO	0	0	0	0	<0,1	<0,1	<0,1
ZrO_2+HfO_2	0	0	0	0	<0,1	<0,1	<0,1
B_2O_3	0	0	0	0	0	0	0
Li_2O	0	0	0	0	0	0	0
Perda ao fogo	13,58	12,62	14,29	13,17	2,97	12,85	25,92

4.1.4 Análise mineralógica por difração de raios X (DRX) das matérias-primas

Os difratogramas de raios X das matérias-primas secas a 110°C são apresentados na Figura 13.

Nas argilas, pode-se observar que os picos de difração predominantes correspondem a caulinita, tendo sido detectados também ilita e quartzo. Além de indícios da presença de goetita e de gibsita. A presença de caulinita obtida no DRX confirmou o resultado da FRX, pois em geral, a argila com elevado teor de alumina apresenta a caulinita como principal argilomineral (SALES JR, 2008), além da

plasticidade encontrada.

Quanto a gibsita, ela sofre uma transformação pseudomórfica em temperaturas em torno de 260°C, o que pode contribuir para aumentar a refratariade da argila e a perda de massa (VIEIRA; SALES; MONTEIRO, 2004). A fase cristalina goetita foi justificada pelo alto teor de ferro detectado na FRX e confere cor avermelhada, pois oxida em hematita.

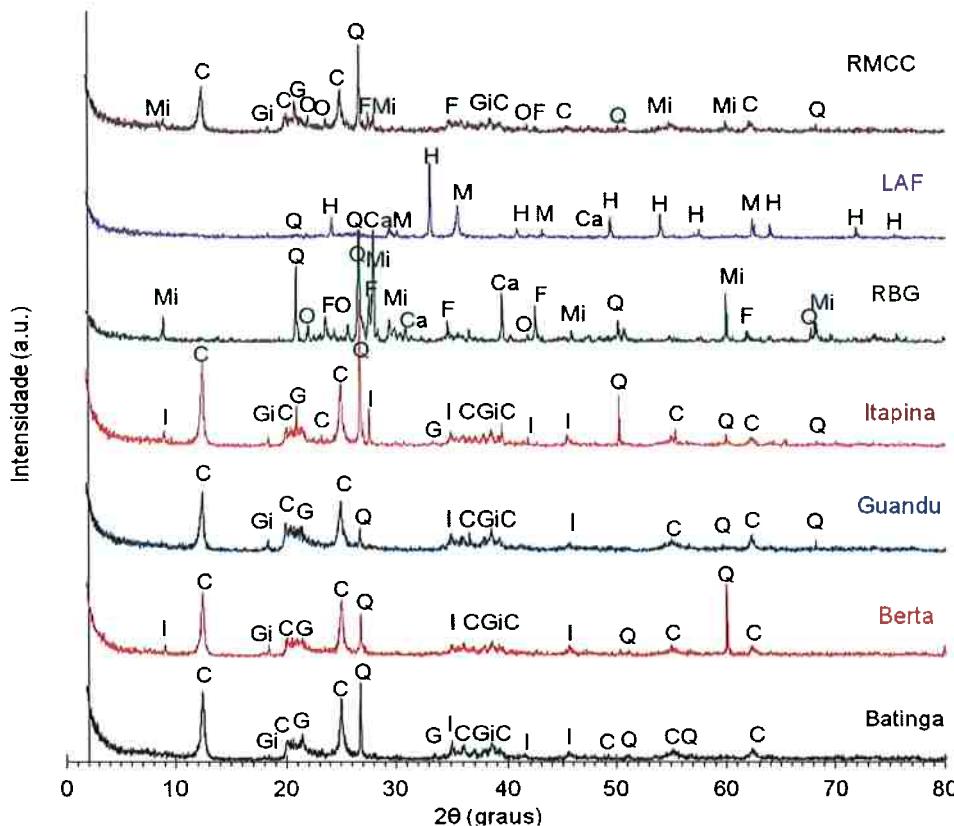
No caso do RBG, o DRX indicou a presença de quartzo, feldspato, mica e calcita; principais minerais constituintes das rochas ornamentais (MANHÃES; MOREIRA; HOLANDA, 2009), além do ortoclásio.

O quartzo presente no RBG pode causar redução na plasticidade e alguns efeitos nocivos para as peças na queima devido as suas mudanças de fase cristalina (em 573°C pode ocorrer a transformação do quartzo “α” em quartzo “β”) que podem ocasionar variações expressivas de volume com a elevação da temperatura (SOUZA SANTOS, 1975) resultando em diminuição da resistência mecânica. A presença da calcita confirmou o CaO encontrado na FRX. O feldspato e a mica atuam como fundentes na etapa de queima da cerâmica e contribuem para diminuir a porosidade das peças. Entretanto, a mica pode ocasionar defeitos nas peças (DIAS, 2011).

O DRX da LAF identificou as fases cristalinas associadas a compostos de ferro como a magnetita e a hematita, corroborando o resultado da FRX, que indicou elevado teor de Fe₂O₃, que pode atuar como fundente em temperaturas mais baixas e ajudar na coloração avermelhada após queima. Foram identificados ainda o quartzo proveniente do SiO₂ e a calcita proveniente do CaO presentes na FRX. Os finos de coque presentes na LAF não foram identificados no DRX; segundo Vieira et al. (2007), isso é devido ao caráter amorfo deles.

O RMCC, formado por todas as matérias-primas da pesquisa, apresentou predominantemente caulinita e quartzo, indícios da presença de goetita e gibsita presentes nas argilas; além da mica, feldspato e ortoclasio provenientes do RBG.

Figura 13 – Difratogramas de raios X das matérias-primas secas a 110°C



Nota: C - caulinita (COD 1011045); Ca - calcita (COD 9009667); F - feldspato (COD 9001898); G - goetita (COD 1008768); Gi - gibsita (COD 1200016); H - hematita (COD 1011240); I - ilita (COD 9013718); M - magnetita (COD 9013530); Mi - mica (COD 9000819); O - ortoclasio (COD 9006347); Q - quartzo (COD 9012602).

Fonte: Autora (2015)

A Figura 14 apresenta os difratogramas das matérias-primas após queima a 850°C na indústria cerâmica. Verifica-se em todas as matérias-primas, que o quartzo (fase residual) ainda está presente, o que pode indicar que na temperatura de queima de 850°C não há a formação completa de fase líquida para dissolução do quartzo.

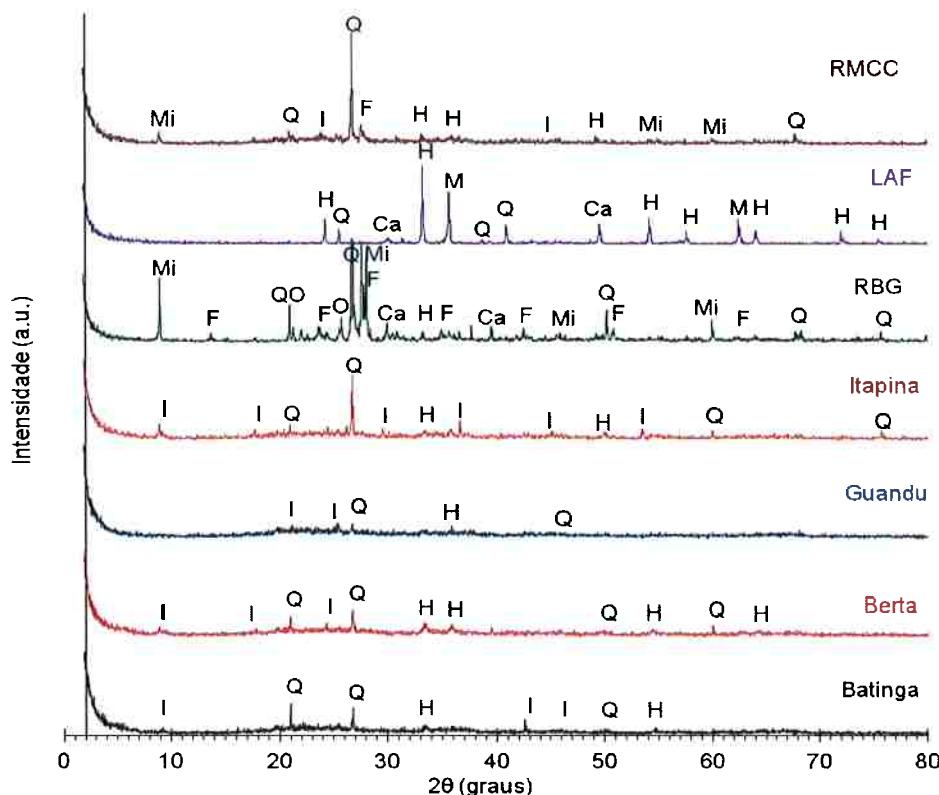
As argilas apresentaram as fases cristalinas: ilita e quartzo (originais das matérias-primas naturais), e hematita proveniente da desidratação do hidróxido de ferro (goetita). A desidroxilação da caulinita provoca a formação da metacaulinita, que é metaestável e amorfa e por isso não aparece no DRX das argilas após a queima.

No RBG, a temperatura de queima não foi suficiente para decompor todos os hidróxidos. A presença de calcita pode indicar que não houve sua total decomposição para CaO com liberação de CO₂. Podem ser observados picos de quartzo, mica, feldspato e provável presença do ortoclasio.

Na LAF, a presença da magnetita e hematita indica que os compostos de ferro não se oxidaram completamente. Há também a presença de quartzo e indícios da presença da calcita.

No RMCC, os picos indicam a presença de quartzo, hematita, mica e indícios da presença de ilita e feldspato; elementos esses presentes nas matérias-primas queimadas que formam o RMCC.

Figura 14 – Difratogramas de raios X das matérias-primas após queima a 850°C



Nota: Ca - calcita (COD 9009667); F - feldspato (COD 9001898); H - hematita (COD 1011240); I - ilita (COD 9013718); M - magnetita (COD 9013530); Mi - mica (COD 9000819); O - ortoclásio (COD 9006347); Q - quartzo (COD 9012602).

Fonte: Autora (2015)

4.1.5 Análise do comportamento térmico das matérias-primas

A Figura 15 apresenta as imagens obtidas na calorimetria exploratória diferencial (DSC), termogravimetria (TG) e na derivada da termogravimetria (DTG) das matérias-primas.

O comportamento térmico das 4 argilas é bem semelhante. Nas argilas (Figuras 15 a, b, c, d), o primeiro pico, endotérmico, ocorreu próximo a 100°C (curva DTG), onde há a perda de água livre existente entre as partículas. Por volta de 260°C o pico

endotérmico ocorreu devido a combustão de matéria orgânica e perda de água dos hidróxidos, provavelmente da gibsita e da goetita. A presença dos hidróxidos resulta na necessidade de energia adicional para sua decomposição. E no caso da gibsita, ocorre liberação de Al_2O_3 que aumenta a refratariedade da massa argilosa (VIEIRA et al., 2003), como já descrito no DRX. Já a decomposição da goetita libera Fe_2O_3 que se mantendo na forma oxidada, também aumenta a refratariedade.

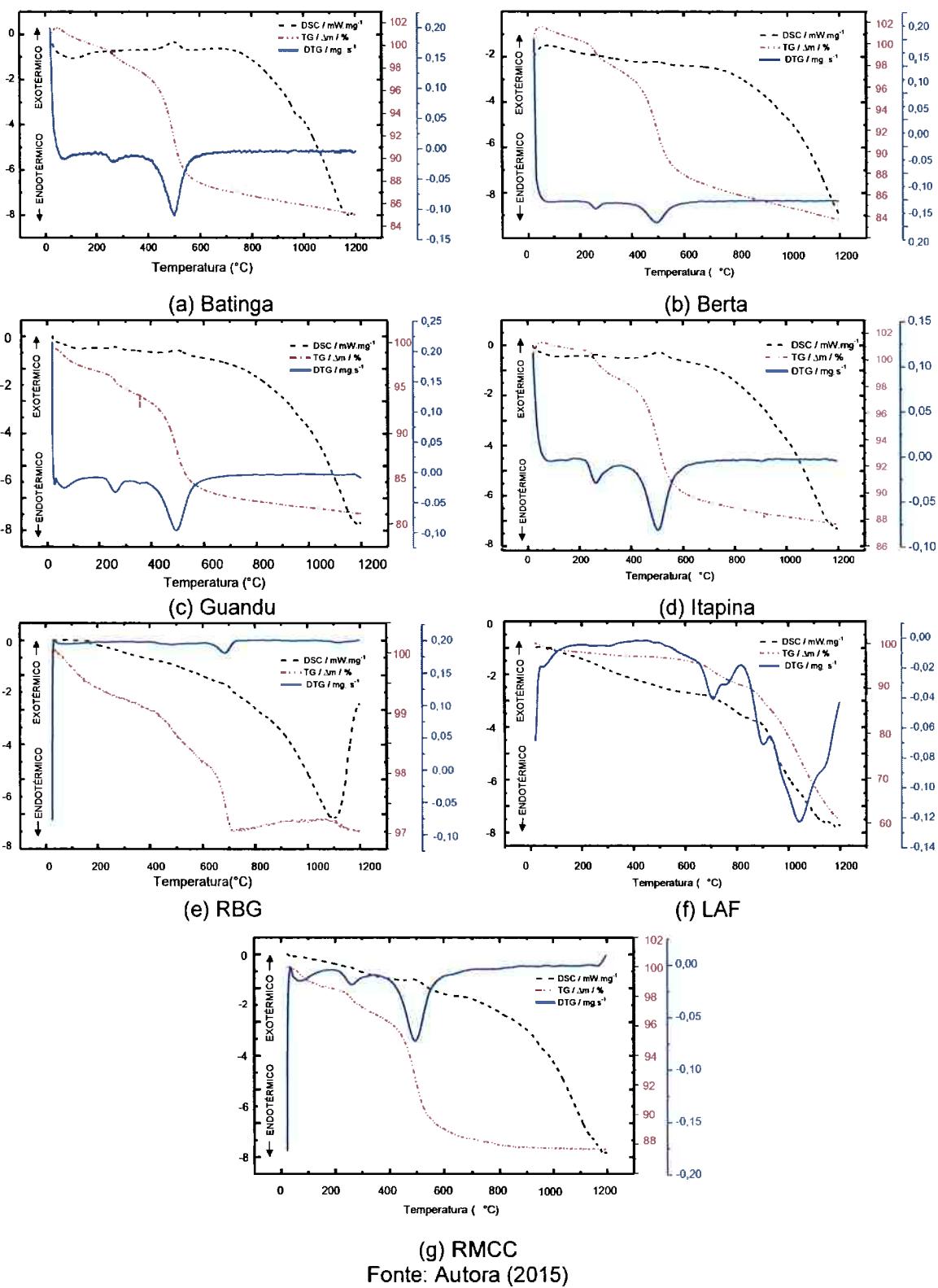
O pico endotérmico de maior intensidade ocorreu em cerca de 500°C, característico da perda de hidroxilas dos argilominerais do grupo da caulinita. Após 500°C, com a saída de água, a cristalinidade desaparece e começa a se formar a metacaulinita, que é amorfá e metaestável. Não se observou no gráfico a fase de vitrificação que iniciaria em cerca de 900°C com a formação do espinélio, nem a nucleação de mulita a partir de 970°C. No gráfico TG, que apresenta a perda de massa com o aumento da temperatura, pode-se verificar que a maior perda de massa nas argilas ocorreu devido a desidroxilação da caulinita em cerca de 500°C, e o valor total da perda de massa foi de cerca de: 15% (Batinga), 16% (Berta), 18% (Guandu) e 12% (Itapina), valores coerentes para argilas cauliníticas (SOUZA SANTOS, 1975) e que corroboram os valores encontrados na FRX.

No RBG (Figura 15 e) ocorreu um pico endotérmico em cerca de 700°C (curva DTG), que pode ser atribuído a decomposição de carbonato, tal como, a calcita. Não foi observado pico exotérmico acima de 800°C que representaria a formação de novas fases cristalinas (silicatos). A perda de massa de 3%, encontrada na curva TG do RBG, é relativamente pequena e mostra que o RBG apresenta boa estabilidade dimensional para temperaturas abaixo de 1200°C.

Na LAF (Figura 15 f), em cerca de 700°C (curva DTG), ocorreu um pico endotérmico que pode ser devido a decomposição da calcita. Em 825°C é possível observar um pico exotérmico bem definido, essa reação pode estar associada a combustão dos finos de coque. Já as reações de oxidação dos compostos de ferro reduzidos podem estar sendo encobertas pelas reações dos finos de coque. Na curva TG, a perda de massa da LAF é de cerca de 38%, valor maior que 25,92% encontrado na FRX. Na calcinação da LAF ocorre reação de redução do óxido de ferro com o carbono residual que provoca remoção do oxigênio e aumento de perda de massa, tal fato deve ter ocorrido no ensaio da análise térmica, que chegou a 1200°C, temperatura maior que a máxima da FRX (1000°C). Com isso, a perda de massa encontrada na

análise térmica é maior que a encontrada na FRX. Esse resultado comprova que a LAF pode contribuir na economia do consumo energético na queima da cerâmica. O RMCC (Figura 15 g) apresentou um comportamento similar ao observado nas quatro argilas. Na curva TG, a perda de massa do RMCC é de cerca de 12%.

Figura 15 – DSC/TG/DTG das matérias-primas



Fonte: Autora (2015)

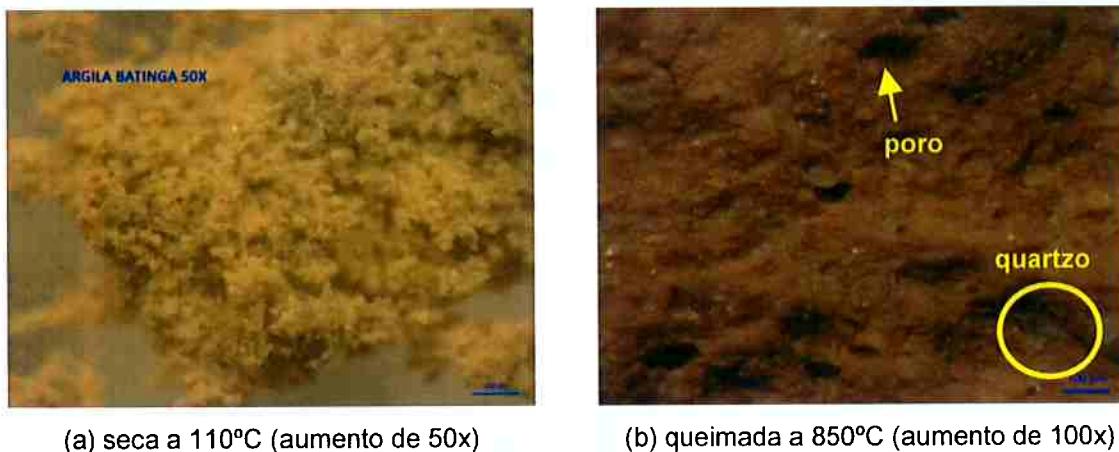
4.1.6 Microscopia óptica das matérias-primas

As imagens da microscopia óptica são apresentadas nas Figuras 16 a 22. Todas as imagens trazem na Figura **a)** linha na parte inferior equivalente a 0,2 mm e na Figura **b)** linha na parte inferior equivalente a 0,1 mm.

Em todas as matérias-primas secas, na forma de pó, pode-se observar a cor e a textura dos grãos.

Na superfície de fratura de esferas queimadas conformadas com as argilas (Figuras 16 a 19) é possível ver grãos de quartzo e poros, assim como uma provável sinterização ou união dos grãos por vitrificação do quartzo. Observa-se também, um escurecimento da cor em relação as amostras não queimadas.

Figura 16 – Imagens da microscopia óptica da argila Batinga

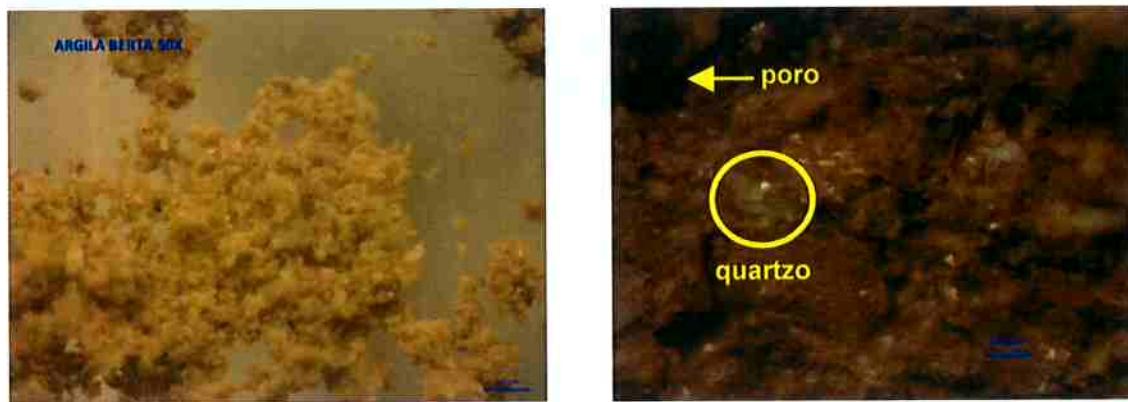


(a) seca a 110°C (aumento de 50x)

(b) queimada a 850°C (aumento de 100x)

Fonte: Autora (2015)

Figura 17 – Imagens da microscopia óptica da argila Berta

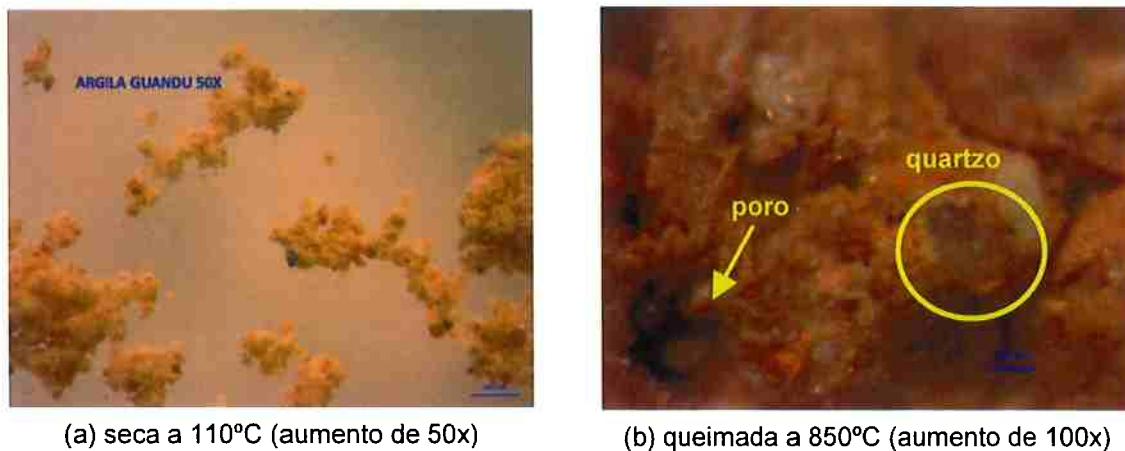


(a) seca a 110°C (aumento de 50x)

(b) queimada a 850°C (aumento de 100x)

Fonte: Autora (2015)

Figura 18 – Imagens da microscopia óptica da argila Guandu

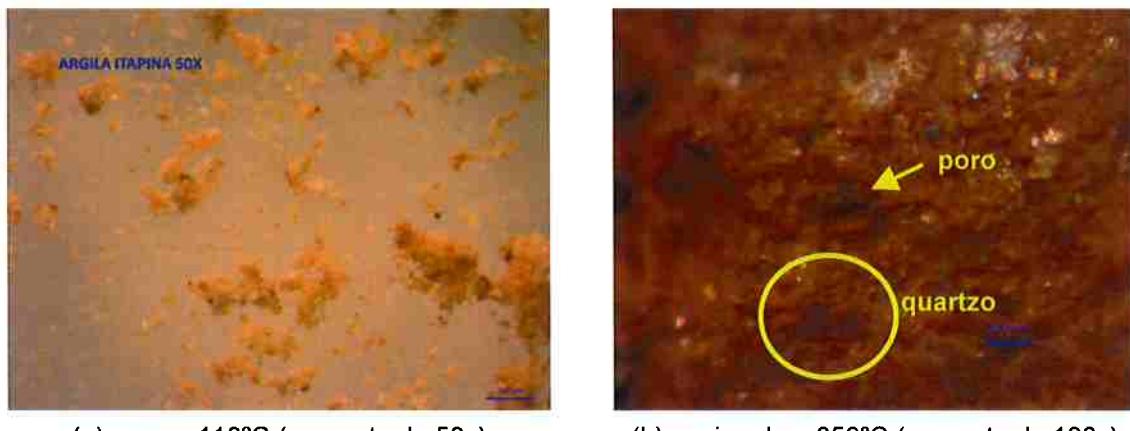


(a) seca a 110°C (aumento de 50x)

(b) queimada a 850°C (aumento de 100x)

Fonte: Autora (2015)

Figura 19 - Imagens da microscopia óptica da argila Itapina



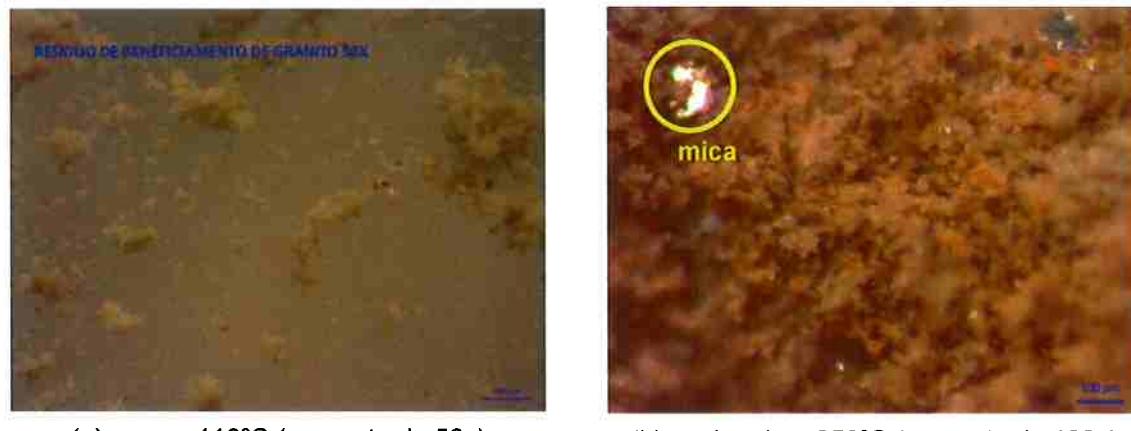
(a) seca a 110°C (aumento de 50x)

(b) queimada a 850°C (aumento de 100x)

Fonte: Autora (2015)

Observa-se no RBG, na superfície de fratura da esfera queimada (Figura 20 b) uma tonalidade de cor mais escura do que na amostra não queimada (Figura 20 a), presença de grão de mica; e a falta de união entre grãos em comparação às argilas.

Figura 20 – Imagens da microscopia óptica do RBG



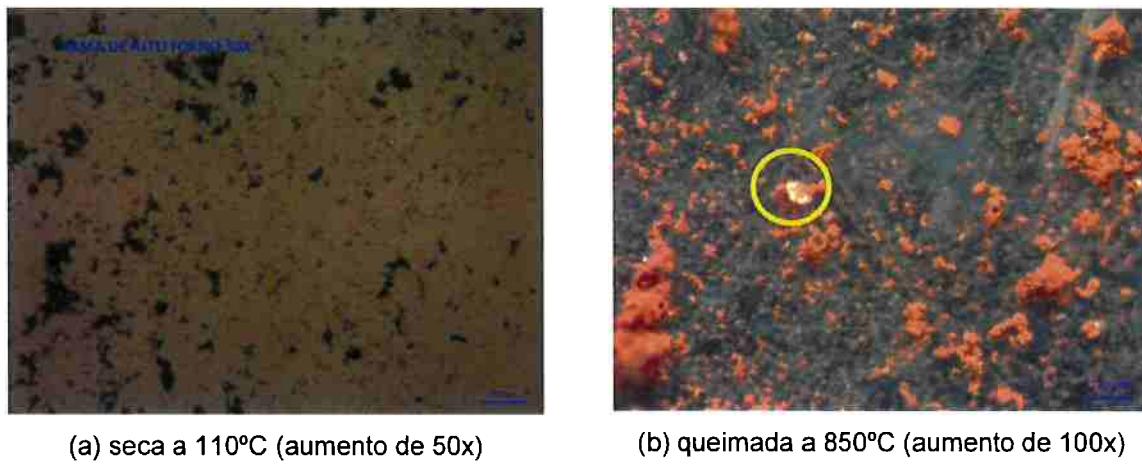
(a) seco a 110°C (aumento de 50x)

(b) queimado a 850°C (aumento de 100x)

Fonte: Autora (2015)

Na LAF não queimada em forma de pó (Figura 21 a), nota-se uma tonalidade preta das partículas. Já na amostra queimada em forma de pó (Figura 21 b) observa-se uma tonalidade avermelhada, em função da combustão do carbono presente na lama. Pode-se ver também uma partícula de quartzo ou de mica.

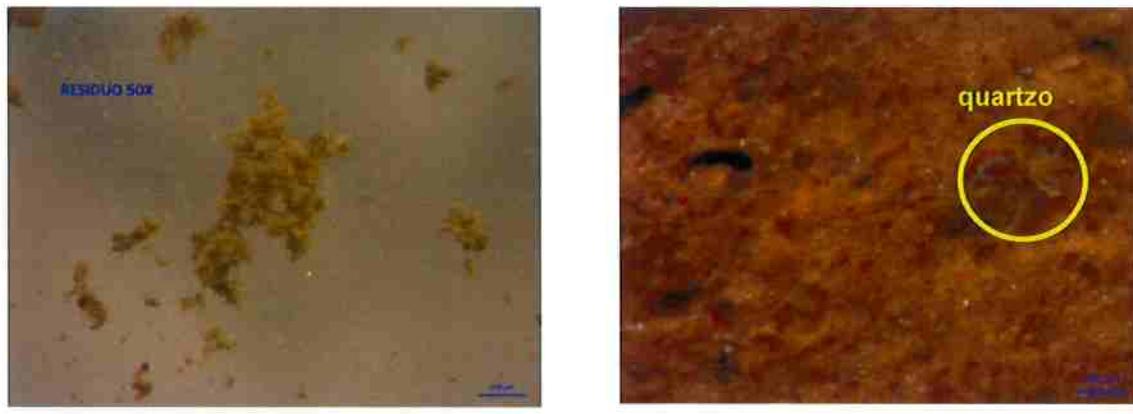
Figura 21 – Imagens da microscopia óptica da LAF



Fonte: Autora (2015)

Na Figura 22, observa-se que as imagens do RMCC são similares as das argilas.

Figura 22 – Imagens da microscopia óptica do RMCC



Fonte: Autora (2015)

4.1.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das matérias-primas

As Figuras 23 a 36 apresentam as imagens de MEV das matérias-primas secas a 110°C e queimadas a 850°C. Todas as matérias-primas não queimadas, apresentaram uma morfologia mais aberta (menos compacta) do que as queimadas, assim como uma distribuição variada de dimensões dos grãos, aglomerados e poros

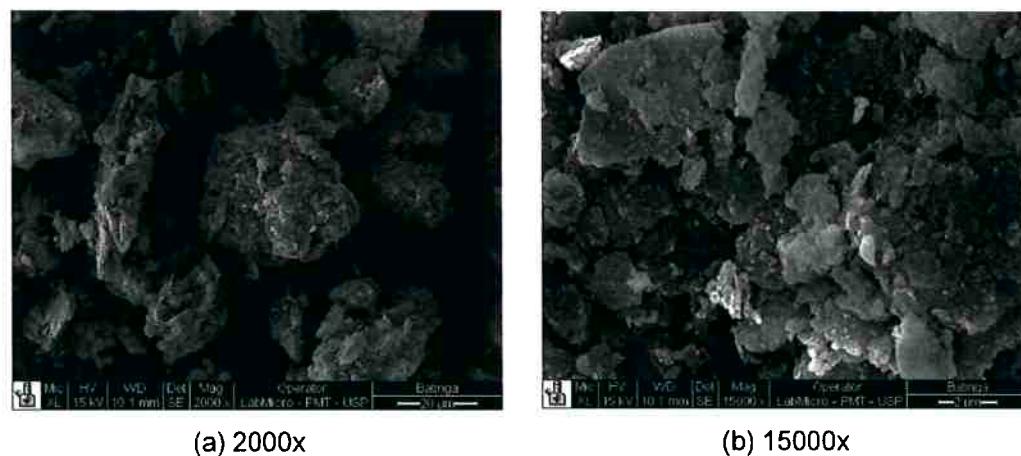
não homogêneos.

As imagens das argilas e do RBG evidenciam que os grãos apresentam formato lamelar, alguns dispersos e outros aglomerados com dimensões variando de 2 µm a 60 µm.

A LAF apresenta grãos de formato heterogêneo com textura mais rugosa que as argilas, com tamanhos variando de 2 µm a 62 µm.

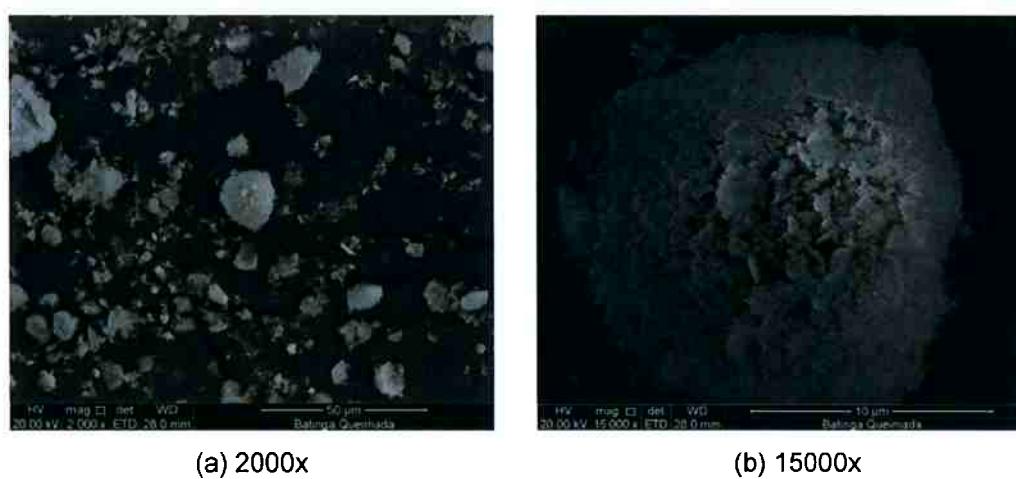
O RMCC apresenta grãos e aglomerados de formato irregular, textura rugosa e tamanhos variando de 2 µm a 50 µm.

Figura 23 – MEV da argila Batinga (seca a 110°C)



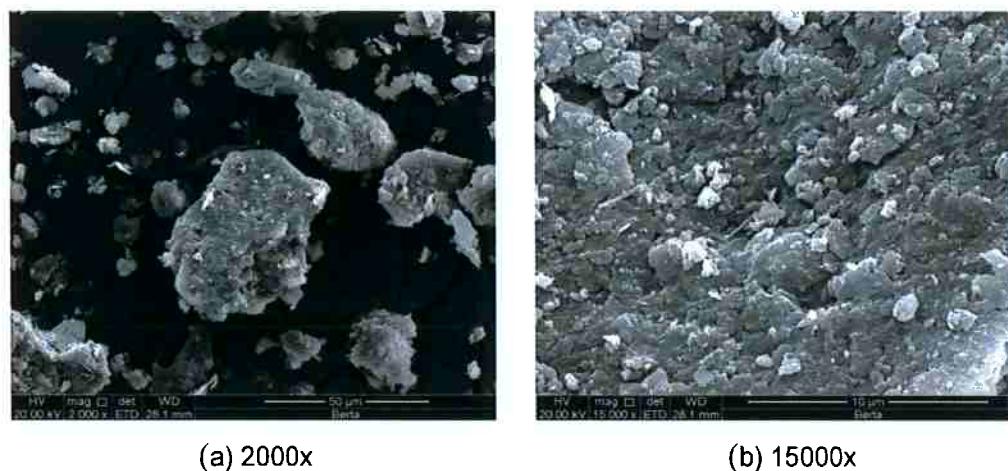
Fonte: Autora (2015)

Figura 24 – MEV da argila Batinga (após queima a 850°C)



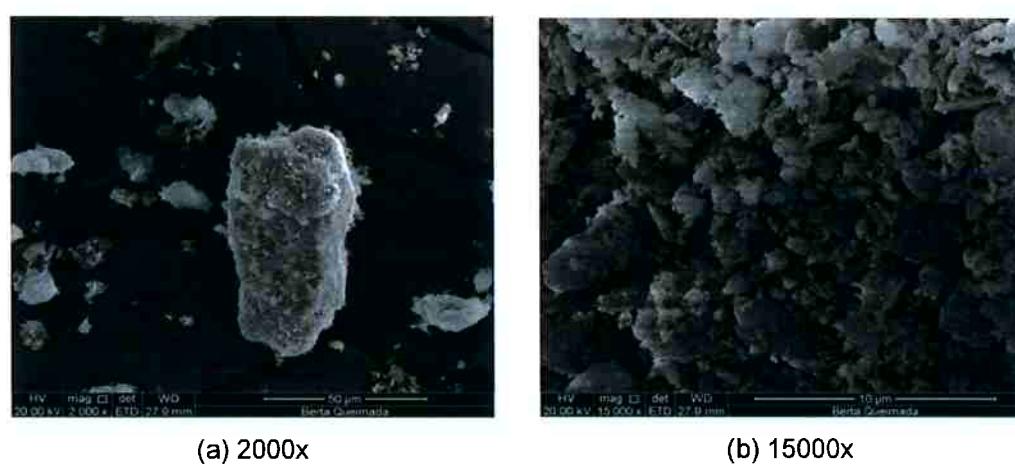
Fonte: Autora (2015)

Figura 25 – MEV da argila Berta (seca a 110°C)



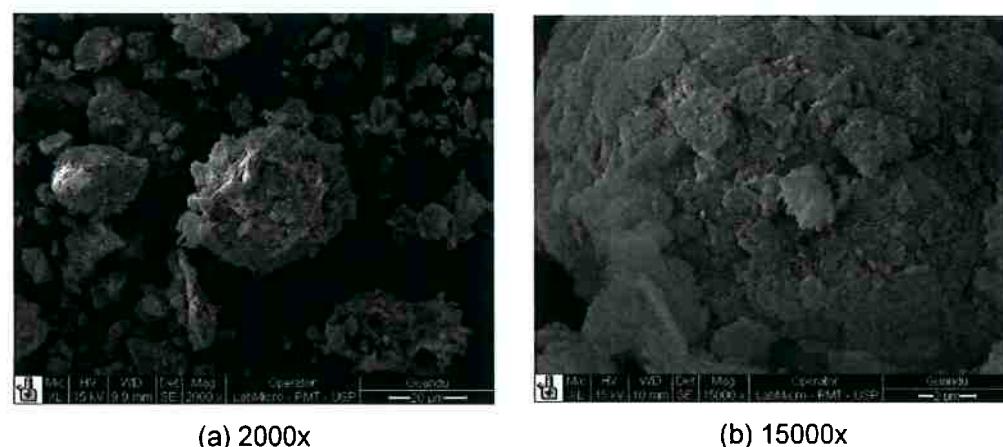
Fonte: Autora (2015)

Figura 26 – MEV da argila Berta (após queima a 850°C)



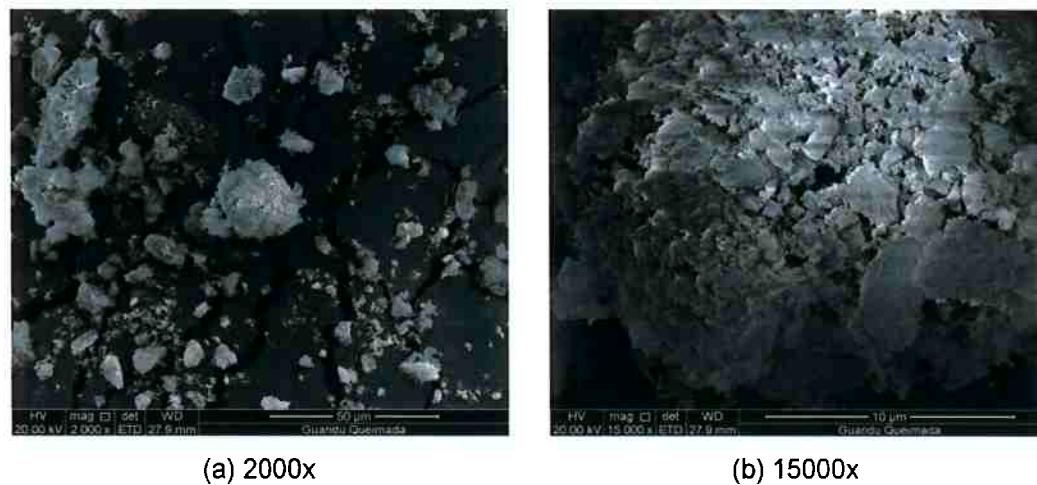
Fonte: Autora (2015)

Figura 27 – MEV da argila Guandu (seca a 110°C)



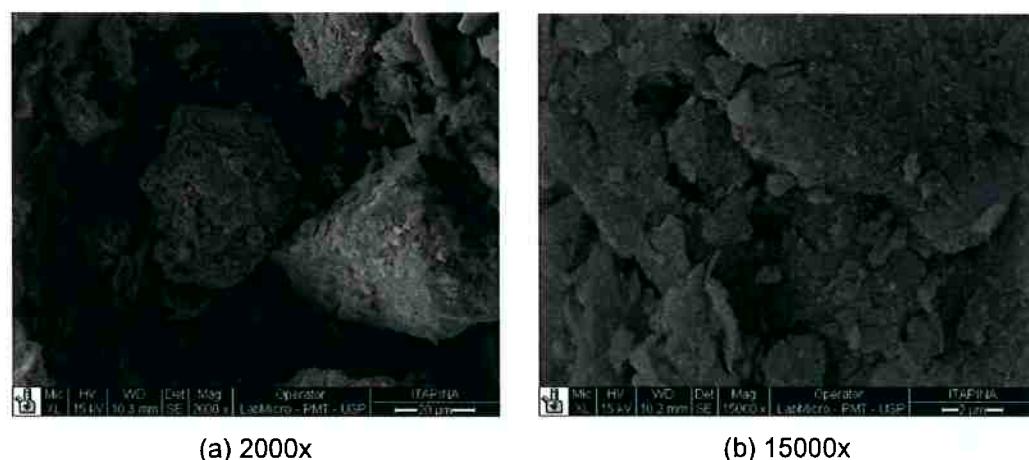
Fonte: Autora (2015)

Figura 28 – MEV da argila Guandu (após queima a 850°C)



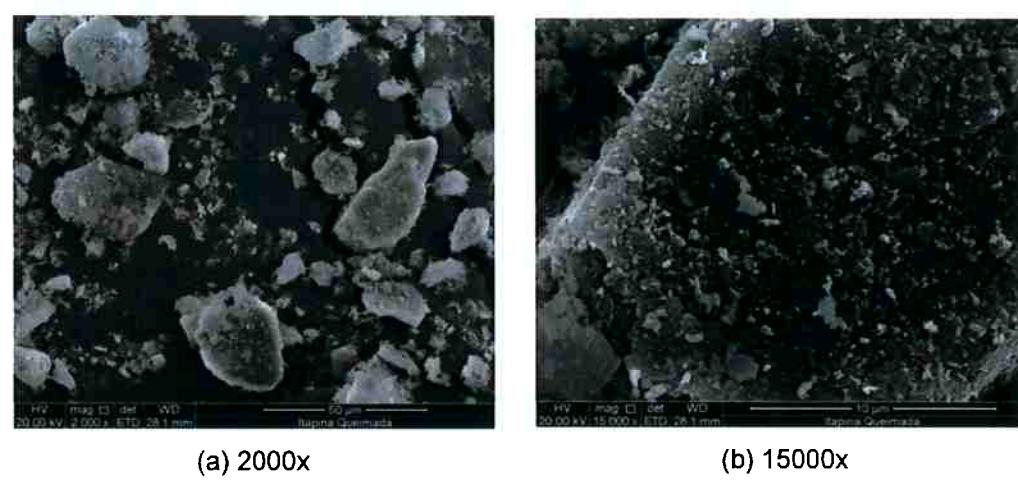
Fonte: Autora (2015)

Figura 29 – MEV da argila Itapina (seca a 110°C)



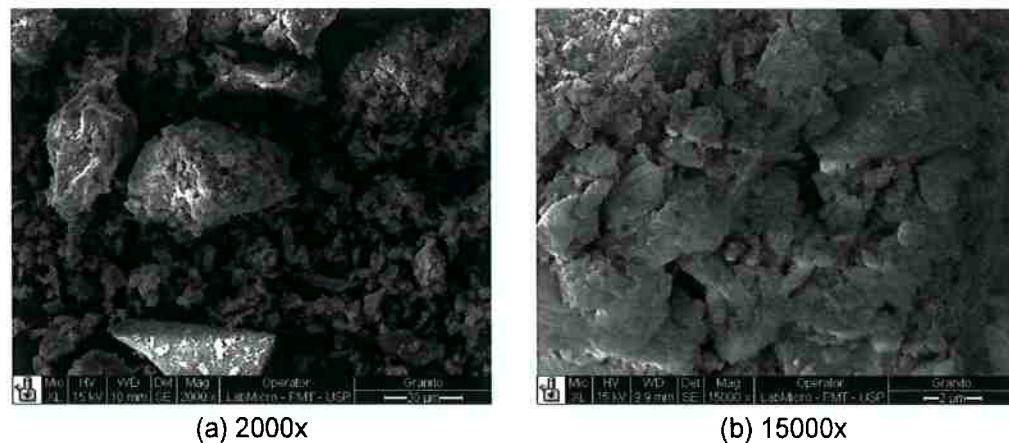
Fonte: Autora (2015)

Figura 30 – MEV da argila Itapina (após queima a 110°C)



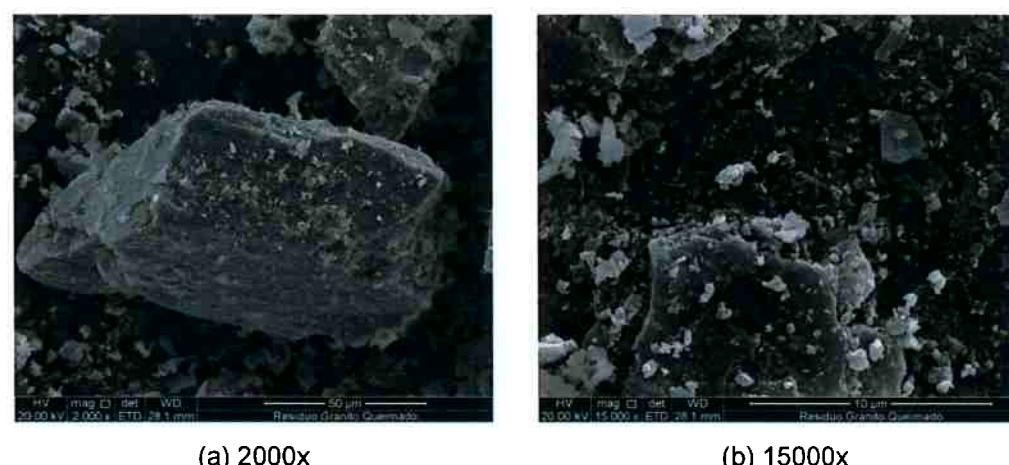
Fonte: Autora (2015)

Figura 31 – MEV do RBG (seco a 110°C)



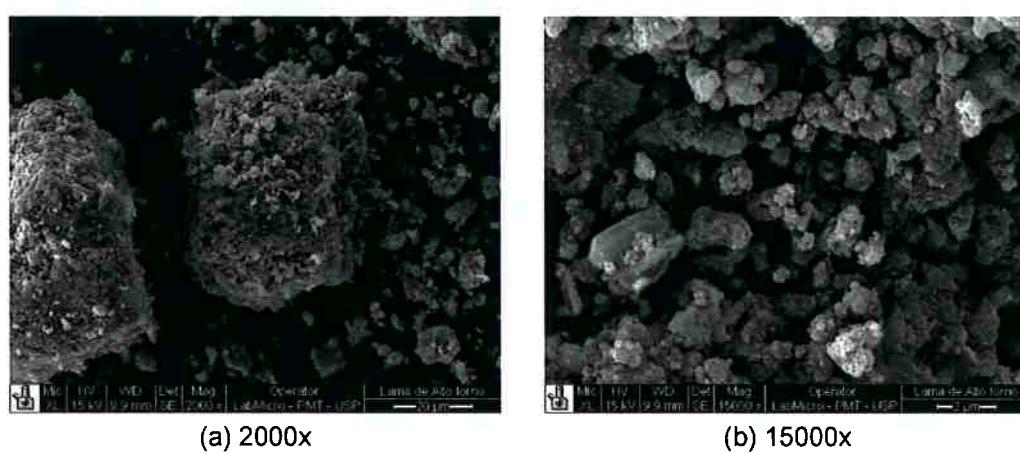
Fonte: Autora (2015)

Figura 32 – MEV do RBG (após queima a 850°C)



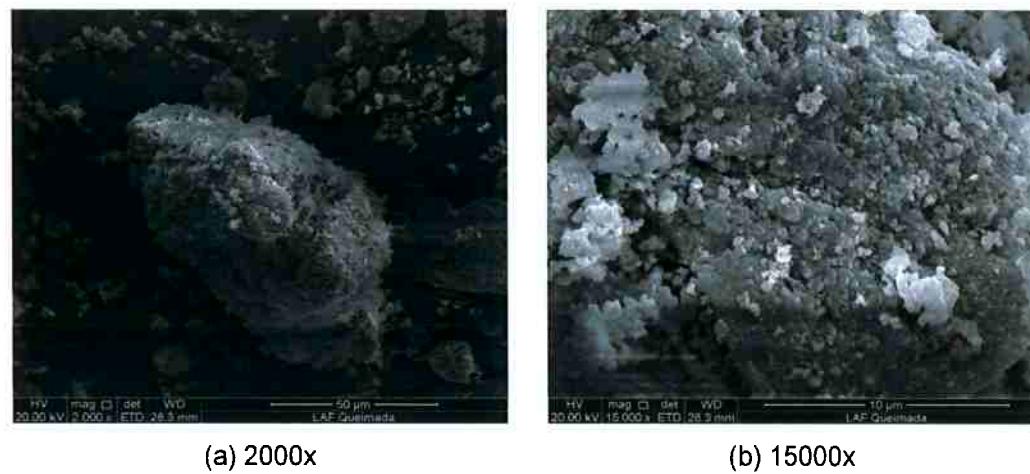
Fonte: Autora (2015)

Figura 33 – MEV da LAF (seca a 110°C)



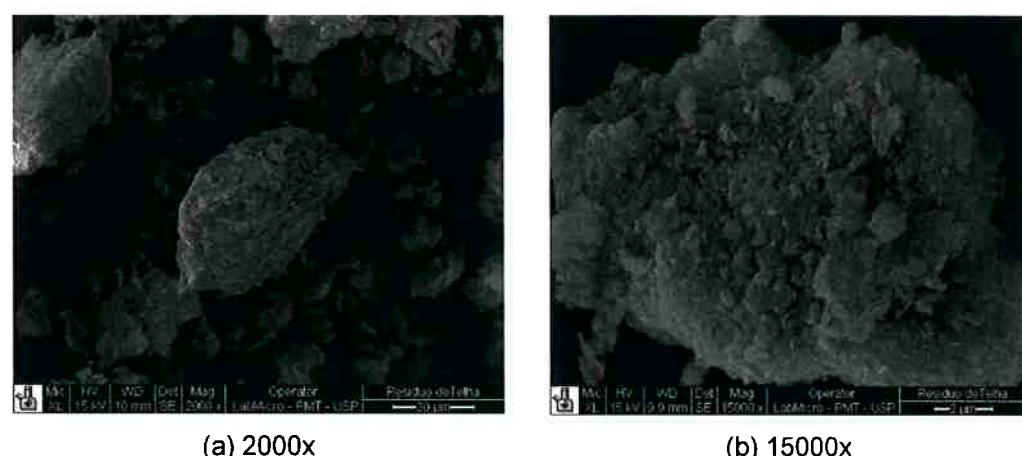
Fonte: Autora (2015)

Figura 34 – MEV da LAF (após queima a 850°C)



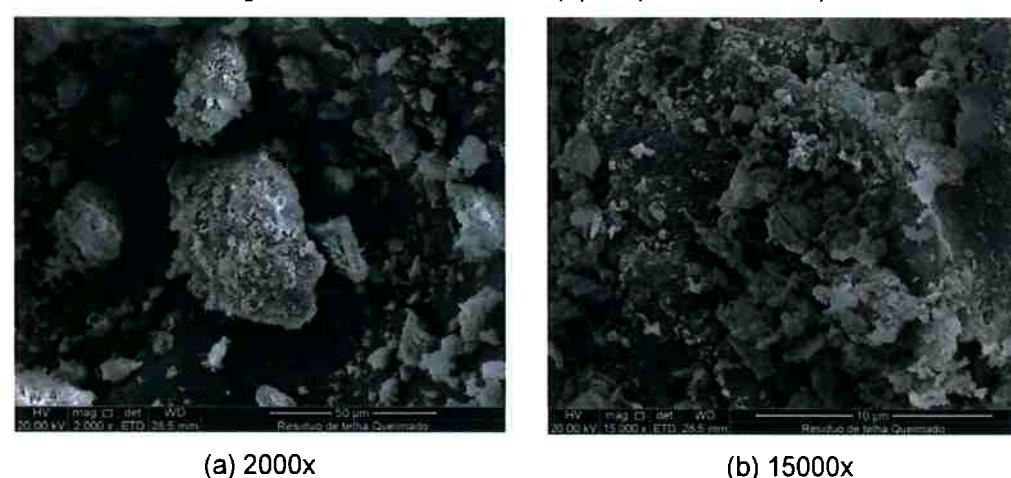
Fonte: Autora (2015)

Figura 35 – MEV do RMCC (seco a 110°C)



Fonte: Autora (2015)

Figura 36 – MEV do RMCC (após queima a 850°C)



Fonte: Autora (2015)

4.1.8 Poder calorífico da lama de alto forno

O poder calorífico medido da LAF foi de 1987 Kcal/kg, o que faz a LAF liberar calor no interior da massa argilosa e diminuir o consumo de combustível primário na queima. O valor encontrado do poder calorífico da LAF é similar ao apresentado por Dias (2011) e Mothé (2008) de 2121 Kcal/kg.

4.2 Propriedades cerâmicas e mecânicas das matérias-primas

Os resultados das propriedades cerâmicas e mecânicas das matérias-primas secas a 110°C e queimadas a 850°C são apresentados nas Tabelas 7 e 8.

As esferas, conformadas com umidade similar a utilizada na fabricação de telhas, devem atender ao valor máximo de 20% para absorção de água (Souza Santos, 1975, p. 397) para indicar que a massa cerâmica em questão possui potencial para ser usada na conformação das telhas.

A Tabela 7 apresenta os resultados com as esferas. Pode-se observar que os valores da perda de secagem (PS) correspondem ao teor de umidade necessário para conformação manual das esferas com cada matéria-prima. O RBG apresentou a menor perda de secagem (21,64%) indicando que necessita de menor teor de umidade para conformação da esfera em relação as outras matérias-primas, o que pode ser em função de ter apresentado menor valor de limite de liquidez (LL) de 28,07%. Enquanto a argila Batinga apresentou a maior perda de secagem (28,71%) em função de ter apresentado o maior valor do LL (76,16%).

Quanto a perda ao fogo (PF), os valores obtidos das argilas estão próximos do limite superior do intervalo de valores de 6,0% a 15,7%, estipulados por Souza Santos (1975) para argilas cauliníticas, o que pode aumentar a porosidade. No RMCC foi obtido o menor valor de perda ao fogo (11,23%) em comparação às argilas. E no caso do RBG a perda ao fogo (3,63%) foi bem menor em relação as outras matérias-primas indicando que o RBG apresenta maior estabilidade dimensional na queima.

A absorção de água (AA) encontrada no RMCC de 21,18% se aproximou do valor máximo de 20% prescrito em Souza Santos (1975) para telhas, e atende ao limite para tijolos (máximo de 25%), enquanto as outras matérias-primas não atenderam nenhum dos limites. A porosidade aparente (PA) das matérias-primas pode ser considerada alta se comparada ao limite máximo de 35% (SOUZA SANTOS, 1975)

para barras, o que corrobora os resultados obtidos na caracterização das matérias-primas, uma vez que, as microscopias indicaram se tratar de matérias-primas porosas, além dos altos valores de perda ao fogo apresentados na FRX. Entretanto, o menor valor de porosidade (35,39%) foi obtido no RMCC, confirmando sua maior densificação em relação as outras matérias-primas, tendo apresentado também os maiores valores de massa específica aparente (MEA) de 1,66 g/cm³ e de massa específica aparente da parte sólida (MEAS) de 2,57 g/cm³.

Os valores das retracções volumétricas de queima (RV_Q) foram coerentes com os valores de perda ao fogo (PF) encontrados, pois em geral, onde foi obtido maior valor da perda ao fogo foi obtido maior valor da retração de queima.

A resistência à compressão após queima (σ_Q) foi maior para o RMCC (3,42 MPa), seguido da argila Guandu (2,16 MPa) e das outras três argilas. Os menores valores de resistências à compressão após secagem (σ_s) de 0,09 MPa e após a queima (σ_Q) de 0,07 MPa foram obtidas para o RBG. Na LAF não foi possível determinar as propriedades após a queima devido ao rompimento das esferas no forno durante a queima.

Para utilização em telhas, as barras secas devem atender a tensão de ruptura à flexão mínima de 3,0 MPa; e nas barras queimadas de 6,5 MPa (Souza Santos, 1975, p. 397), além de ser necessário obedecer ao valor máximo de 20% de absorção de água.

As barras também devem obedecer aos limites especificados para as argilas padrão-brasileiras usadas em cerâmica vermelha de: tensão de ruptura à flexão mínima de 0,5 MPa a 7,0 MPa para barras secas, e para barras queimadas mínimo de 6,0 MPa, absorção de água máxima de 25%, porosidade aparente máxima de 35% e MEA entre 1,5 g/cm³ a 2,0 g/cm³ (SOUZA SANTOS, 1975, p. 205).

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos com as barras, que corroboram os resultados encontrados nas esferas. Nas barras foi possível a determinação das propriedades na LAF, a qual apresentou maior valor de perda ao fogo (26,37%) e maiores valores de absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) resultando em mínimos valores de MEA e MEAS em relação as outras matérias-primas.

Pode-se observar que os valores da perda de secagem (PS) nas barras corresponderam ao teor de umidade adotado para conformação e que a menor

perda de secagem ocorreu no RBG (8,45%) e a maior na argila Batinga (9,75%), confirmando a relação com os limites de liquidez como ocorreu nas esferas.

Quanto a perda ao fogo (PF), os valores obtidos das argilas atenderam aos valores estipulados por Souza Santos (1975) para argilas cauliníticas. Considerando os valores de perda ao fogo obtidos das argilas, o RMCC obteve o menor valor de 11,49%. Entretanto, a menor perda ao fogo (PF) entre todas as matérias-primas foi obtida no RBG (2,97%).

A absorção de água, com limite máximo especificado de 25% (SOUZA SANTOS, p. 205, 1975), foi atendida com exceção da argila Batinga e da LAF. No caso de utilização em telhas, onde o limite é 20%, nenhuma das matérias-primas atendeu (SOUZA SANTOS, 1975, p. 397).

A porosidade aparente do RMCC foi de 35,83%, que juntamente com as outras matérias-primas não atendeu ao limite máximo de 35% (SOUZA SANTOS, 1975, p. 205), o que confirma os resultados das esferas e a relação direta entre absorção e porosidade.

O RMCC apresentou MEA de 1,66 g/cm³ e MEAS de 2,81 g/cm³ confirmado maior densificação em relação as outras matérias-primas.

Os valores da retração linear (RL) foram coerentes com os valores de perda ao fogo (PF) encontrados, como ocorrido nas esferas.

Quanto a tensão de ruptura à flexão após a queima (TR_Q) medida nas barras, pode-se verificar que a argila Guandu (8,85 MPa), argila Batinga (7,27 MPa) e RMCC (6,74 MPa) apresentaram os maiores valores e atenderam ao valor mínimo de 6,0 MPa para as argilas padrão-brasileiras usadas em cerâmica vermelha estipulado por Souza Santos (1975) e atenderam também ao valor de 6,5 MPa para uso em telhas; enquanto as argilas Berta e Itapina, RBG e LAF não atenderam.

O RMCC apresentou os melhores resultados das propriedades cerâmicas e mecânicas em comparação as outras matérias-primas, tanto nas barras quanto nas esferas.

Tabela 7 – Propriedades cerâmicas e mecânicas das matérias-primas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C – valores médios

MATERIAIS	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	MEAS(g/cm ³)	RV _S (%)	RV _Q (%)	σ_s (MPa)	σ_Q (MPa)
Argila Battinga	28,71	13,32	26,95	39,87	1,49	2,48	0,50	8,98	0,48	2,06
Argila Berta	25,09	12,84	26,94	39,40	1,49	2,50	1,91	4,22	0,61	1,89
Argila Guandu	26,46	14,34	25,38	37,92	1,54	2,51	0,70	12,03	0,61	2,16
Argila Itapina	24,50	11,86	25,21	37,41	1,52	2,45	0,62	3,80	0,62	1,31
RBG	21,64	3,63	26,21	38,47	1,50	2,51	1,18	-0,41	0,09	0,07
RMCC	23,12	11,23	21,18	35,39	1,66	2,57	2,02	5,83	0,69	3,42
LAF	25,10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,05	n.d.	0,19	n.d.

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de água ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S=retração volumétrica após secagem; RV_Q=retração volumétrica após queima; σ_Q = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

Nota: n.d.= não determinado.

Tabela 8 – Propriedades cerâmicas e mecânicas das matérias-primas em barras secas a 110°C e queimadas a 850°C – valores médios

MATERIAIS	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RLs(%)	RLq(%)	TRs(MPa)	TRq(MPa)
Argila Batinga	9,75	13,20	25,67	41,62	1,62	2,78	0,02	3,67	1,03	7,27
Argila Berta	9,27	12,62	24,77	41,34	1,62	2,77	0,07	2,36	1,33	4,23
Argila Guandu	9,57	14,33	24,32	39,80	1,65	2,77	0,13	3,93	1,13	8,85
Argila Itapina	9,00	12,16	24,17	39,33	1,63	2,77	0,11	1,74	1,36	3,71
RBG	8,45	2,97	24,67	39,94	1,62	2,77	0,06	2,28	0,56	1,27
RMCC	9,13	11,49	21,57	35,83	1,66	2,81	0,11	2,29	1,97	6,74
LAF	9,30	26,37	39,04	56,65	1,46	3,37	0,09	2,24	0,73	0,20
Referência	-	-	≤ 25	≤ 35	1,5 a 2,0*	-	-	-	0,5 a 7,0	≥ 6,0

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de água; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RL_s= retração linear após secagem; RL_q= retração linear após queima; TR_s= tensão de ruptura à flexão após secagem; TR_q= tensão de ruptura à flexão após queima.

Nota: Dados de referência (SOUZA SANTOS, 1975, p.205), *valores aproximados.

4.3 Estudo da incorporação dos resíduos na massa argilosa – 1^a etapa

Na 1^a etapa foi feita a incorporação de cada resíduo em cada argila nos teores de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% (massa) para avaliação das propriedades cerâmicas e mecânicas nas esferas. Além do teor de 5% (massa) na LAF. As Tabelas 9 a 20 apresentam os resultados encontrados na 1^a etapa.

De acordo com as Tabelas 9 a 12, que ilustram o comportamento dos corpos de prova com RBG incorporado à cada argila, observa-se que os valores de: perda de secagem (PS), perda ao fogo (PF), retração volumétrica de queima (RV_Q), absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) diminuíram com o aumento do teor de RBG. Sendo que os mínimos valores de absorção e porosidade foram encontrados no teor de 70% (massa) para as argilas Guandu e Itapina e no teor de 80% (massa) para as argilas Batinga e Berta; enquanto MEA e MEAS tiveram valores máximos entre 50% e 70% de resíduo. Com isso, pode-se dizer que entre 50% e 70% (massa) de RBG, os corpos de prova apresentaram uma maior densificação, que pode ter ocorrido em função do preenchimento dos poros intersticiais dos grãos das argilas pelo RBG, que atua como um “enchimento” promovendo o empacotamento físico dos grãos. Com mais de 70% (massa) de RBG incorporado nas argilas não há mais eficácia no preenchimento dos interstícios para contribuir na densificação, além de haver um excesso de partículas de quartzo.

Os valores da resistência à compressão nos corpos de prova secos (σ_S) diminuiu com o aumento do teor do RBG, exceto com a argila Batinga. Neste caso, houve aumento da resistência com o aumento do teor de RBG em até 60% (massa), após isso o comportamento foi similar ao das outras argilas. Os valores de resistência à compressão após a queima (σ_Q) diminuíram com o aumento do teor do resíduo, provavelmente devido ao aumento do teor de quartzo, presente no RBG, que causa pontos de fratura diminuindo a resistência mecânica nos corpos de prova. Além disso, na temperatura de queima de 850°C da fábrica, a fase líquida não deve ter se formado ao ponto de contribuir na densificação e no aumento da resistência mecânica dos corpos de prova.

As Tabelas 13 a 16 ilustram o comportamento dos corpos de prova com o RMCC incorporado à cada argila. Observa-se que os valores de: perda de secagem (PS), perda ao fogo (PF), absorção de água (AA), porosidade aparente (PA), retração de

queima (RV_Q) diminuíram com o aumento do teor de resíduo. E os valores de MEA e MEAS aumentaram com o aumento do teor de RMCC indicando melhoria na densificação dos corpos de prova com a incorporação do resíduo, o qual contém RBG em sua composição, que contribui para essa densificação.

Os valores de resistência à compressão nos corpos de prova secos (σ_S) e queimados (σ_Q) aumentaram com o aumento do teor do RMCC. Tais resultados favoráveis indicam a possibilidade de utilização de altos teores de RMCC na massa argilosa.

De acordo com as Tabelas 17 a 20, que ilustram o comportamento dos corpos de prova de cada argila com incorporação da LAF, observa-se que os valores de perda ao fogo (PF), absorção de água (AA), porosidade aparente (PA), retração de queima (RV_Q) aumentaram com o aumento do teor da LAF. Já os valores da MEA e da perda de secagem (PS), em geral, diminuíram. As máximas resistências à compressão nos corpos de prova secos (σ_S) e queimados (σ_Q) foram encontradas nos teores de 5% a 40% (massa) de resíduo. A partir daí, os valores de resistência à compressão diminuíram com o aumento do teor de LAF. Este comportamento pode ser atribuído a composição mineralógica da LAF, pois a hematita permanece inerte durante a queima e os finos de coque aumentam a porosidade da massa argilosa. Portanto, os resultados indicam o uso de baixos teores de LAF na massa argilosa.

Pode-se verificar que a argila Batinga apresentou melhor comportamento em relação as outras argilas quando misturada aos resíduos separadamente. E que o RMCC apresentou melhores resultados em relação aos outros dois resíduos quando incorporado à cada argila.

Considerando os resultados da 1^a etapa, onde cada resíduo foi incorporado à cada argila, pode-se sugerir o teor de incorporação de RBG de 50% a 70%; o teor do RMCC de 80% a 90%; e o teor de LAF de 5% a 40% (massa).

Tabela 9 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RBG e argila Batinga – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _Q (%)	σ_S (MPa)	σ_Q (MPa)
10	28,57	12,50	25,06	37,54	1,54	2,40	2,50	7,59	0,58	2,63
20	28,08	10,68	23,85	36,23	1,57	2,40	3,09	6,78	0,72	4,11
30	27,88	9,23	23,03	35,10	1,58	2,41	3,73	6,63	0,73	4,17
40	26,23	8,74	21,89	34,18	1,59	2,42	2,43	5,41	0,76	3,80
50	24,43	8,72	21,08	34,03	1,64	2,48	2,10	3,91	0,77	3,42
60	24,07	6,64	21,08	33,44	1,65	2,48	1,98	3,31	0,85	2,74
70	23,22	5,38	21,00	33,39	1,60	2,42	2,66	2,47	0,32	1,03
80	23,13	4,46	20,67	32,90	1,60	2,39	2,39	1,88	0,31	0,81
90	21,67	3,90	21,66	33,75	1,57	2,37	1,97	0,36	0,21	0,81

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_Q= retração volumétrica após queima; σ_S = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

Tabela 10 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C com RBG e argila Berta – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _A (%)	σ_S (MPa)	σ_Q (MPa)
10	25,51	11,05	26,33	37,87	1,50	2,41	1,76	3,47	0,43	1,56
20	25,05	9,83	25,20	37,57	1,52	2,44	1,71	3,32	0,41	0,88
30	25,03	9,65	24,87	37,49	1,54	2,44	1,63	3,10	0,38	0,87
40	23,62	7,99	24,02	36,32	1,54	2,44	1,19	1,84	0,35	0,84
50	23,05	6,96	23,61	36,09	1,54	2,44	0,97	1,08	0,30	0,73
60	22,74	6,00	23,54	36,09	1,55	2,46	1,46	0,89	0,22	0,63
70	22,56	5,13	23,47	35,76	1,52	2,37	1,45	0,76	0,20	0,61
80	21,36	4,26	21,96	34,32	1,52	2,40	1,09	0,74	0,13	0,43
90	21,16	3,40	23,43	34,82	1,52	2,36	1,41	0,43	0,12	0,17

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_A= retração volumétrica após seccagem; σ_S = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

Tabela 11 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RBG e argila Guandu – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _A (%)	σ_s (MPa)	σ_q (MPa)
10	27,32	13,36	23,40	36,38	1,58	2,48	1,64	8,53	0,62	2,32
20	25,53	11,52	22,05	35,65	1,61	2,49	3,99	8,40	0,62	2,96
30	25,09	11,50	22,03	35,20	1,61	2,49	3,20	5,26	0,67	2,57
40	24,30	9,47	21,54	34,82	1,62	2,49	2,92	5,07	0,49	2,56
50	24,22	9,35	21,18	33,86	1,65	2,49	3,59	3,66	0,42	2,27
60	23,97	6,86	21,11	33,67	1,60	2,41	3,77	2,84	0,42	2,00
70	22,92	5,59	20,94	33,43	1,60	2,40	3,84	2,58	0,36	1,17
80	22,79	4,64	21,50	34,00	1,57	2,37	2,40	1,37	0,21	0,79
90	22,32	3,62	22,50	33,22	1,58	2,36	1,90	1,15	0,19	0,46

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_A= retração volumétrica após queima; σ_s = resistência à compressão após secagem; σ_q = resistência à compressão após queima.

Tabela 12 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RBG e argila Itapina – valores médios

Tenor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _Q (%)	σ_S (MPa)	σ_Q (MPa)
10	24,98	11,55	24,54	36,19	1,52	2,38	1,27	4,13	0,55	1,92
20	24,88	9,81	23,68	35,94	1,52	2,38	2,20	3,94	0,68	1,68
30	24,64	8,01	23,56	35,89	1,52	2,38	3,47	3,92	0,43	1,49
40	24,37	7,68	23,37	35,59	1,53	2,38	2,16	3,25	0,39	1,04
50	24,14	6,93	23,32	35,46	1,53	2,38	1,71	3,23	0,33	0,77
60	23,22	6,00	23,29	35,33	1,53	2,38	3,83	1,85	0,24	0,51
70	22,35	4,93	21,61	33,62	1,56	2,39	2,85	1,81	0,20	0,43
80	21,91	4,58	22,25	34,42	1,55	2,36	2,26	1,06	0,16	0,41
90	21,73	3,57	24,12	35,34	1,54	2,35	2,35	0,85	0,15	0,22

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_Q= retração volumétrica após queima; σ_S = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

Tabela 13 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RMCC e argila Batinga - valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _A (%)	σ_S (MPa)	σ_Q (MPa)
10	28,71	13,33	25,74	39,09	1,55	2,54	4,90	8,84	0,57	2,35
20	28,39	12,68	26,04	39,31	1,53	2,49	9,46	8,63	0,63	2,36
30	28,11	12,64	25,34	38,85	1,53	2,51	9,88	8,13	0,63	2,48
40	26,89	12,57	24,53	37,57	1,53	2,52	7,25	7,25	0,62	2,48
50	26,12	12,30	23,04	37,55	1,61	2,52	3,45	7,19	0,61	2,76
60	25,97	11,76	22,83	36,01	1,61	2,52	5,99	7,07	0,61	3,14
70	25,23	11,70	22,44	35,59	1,60	2,52	7,76	7,03	0,65	3,70
80	24,42	11,49	21,97	35,13	1,62	2,56	2,77	7,00	0,64	3,68
90	23,46	11,24	21,40	35,06	1,67	2,57	4,87	6,89	0,67	3,78

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_A= retração volumétrica após queima; σ_S = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

Tabela 14 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RMCC e argila Berta – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _Q (%)	σ_S (MPa)	σ_Q (MPa)
10	25,78	12,64	26,25	39,25	1,52	2,52	3,09	6,41	0,65	2,04
20	25,62	12,62	25,34	38,56	1,52	2,48	4,97	6,25	0,66	2,81
30	25,52	12,35	25,48	38,28	1,52	2,48	6,85	5,81	0,68	3,15
40	25,09	12,26	24,04	37,03	1,54	2,48	1,26	4,93	0,69	3,16
50	24,34	11,85	23,63	36,92	1,60	2,49	3,56	4,73	0,69	3,18
60	23,89	11,39	22,69	35,59	1,61	2,49	3,17	4,61	0,68	3,40
70	23,87	11,36	22,07	35,15	1,61	2,49	0,58	4,58	0,69	3,42
80	22,95	11,34	21,66	35,12	1,65	2,54	2,63	4,40	0,78	3,49
90	21,79	11,31	21,22	35,00	1,67	2,59	2,95	4,00	0,77	2,48

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_Q= retração volumétrica após queima; σ_S = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

Tabela 15 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RMCC e argila Guandu – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _A (%)	σ_S (MPa)	σ_Q (MPa)
10	27,20	14,35	24,93	39,25	1,54	2,59	2,97	10,45	0,56	1,50
20	26,89	13,76	24,83	38,19	1,54	2,49	9,22	9,34	0,56	1,54
30	26,15	13,32	23,97	37,60	1,57	2,50	9,48	9,09	0,56	1,69
40	25,48	13,14	23,86	37,39	1,57	2,50	9,57	8,79	0,59	2,00
50	24,86	12,26	22,47	36,47	1,64	2,57	2,95	8,39	0,65	2,07
60	23,80	12,21	22,13	36,25	1,64	2,57	2,59	7,95	0,65	2,27
70	23,56	11,65	21,65	35,99	1,64	2,57	9,74	7,39	0,68	2,35
80	22,88	11,65	21,41	35,31	1,67	2,58	3,74	7,21	0,68	2,52
90	22,57	11,35	21,09	34,76	1,67	2,58	2,86	6,83	0,69	2,93

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_A= retração volumétrica após queima; σ_S = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

Tabela 16 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RMCC e argila Itapina – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _Q (%)	σ_S (MPa)	σ_Q (MPa)
10	24,97	12,10	24,36	37,10	1,56	2,48	6,79	8,33	0,54	1,98
20	24,29	11,64	24,06	36,56	1,52	2,39	4,19	6,05	0,55	2,09
30	24,13	11,52	23,92	36,55	1,53	2,41	9,93	5,96	0,59	2,31
40	23,88	11,51	23,83	36,54	1,53	2,42	8,70	5,46	0,60	2,48
50	23,63	11,09	22,73	35,98	1,62	2,50	7,15	5,35	0,60	2,63
60	23,63	11,04	22,16	35,36	1,63	2,52	7,50	5,15	0,61	2,64
70	23,53	10,99	21,57	35,32	1,63	2,52	5,67	5,05	0,63	3,23
80	23,15	10,85	21,52	34,54	1,63	2,52	5,36	5,01	0,56	2,96
90	22,83	10,84	21,08	34,25	1,65	2,52	6,42	4,80	0,56	2,77

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_Q= retração volumétrica após queima; σ_S = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

Tabela 17 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 850°C com LAF e argila Battinga – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	MEAS(g/cm ³)	RV _S (%)	RV _A (%)	σ_S (MPa)	σ_Q (MPa)
5	28,37	13,81	26,30	39,27	1,52	2,51	10,71	4,57	0,45	2,80
10	28,11	15,61	26,62	39,53	1,48	2,44	8,21	4,92	0,56	3,05
20	27,87	16,42	26,78	39,96	1,45	2,40	10,01	5,26	0,57	3,07
30	27,76	19,06	28,47	40,76	1,41	2,40	10,11	5,30	0,68	3,82
40	26,19	19,60	28,32	41,13	1,39	2,40	1,24	5,53	0,76	2,97
50	25,94	22,30	30,08	42,27	1,39	2,41	6,98	6,30	0,66	2,36
60	25,39	22,73	31,89	44,15	1,38	2,48	8,49	6,39	0,60	1,38
70	25,13	24,29	33,35	47,03	1,38	2,56	6,13	7,48	0,55	1,10
80	24,99	26,11	35,25	48,19	1,37	2,64	6,86	7,96	0,48	0,67
90	25,95	28,59	39,86	51,81	1,33	2,76	5,33	10,35	0,40	0,23

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de água; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S=retração volumétrica após secagem; RV_A=retração volumétrica após secagem; σ_S =resistência à compressão após secagem; σ_Q =resistência à compressão após queima.

Tabela 18 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com LAF e argila Berta – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _s (%)	RV _Q (%)	σ_s (MPa)	σ_Q (MPa)
5	26,87	13,28	27,40	38,79	1,44	2,36	7,72	4,65	0,59	1,59
10	26,87	14,05	27,84	39,41	1,44	2,37	6,93	4,59	0,63	1,62
20	26,55	15,42	28,14	40,02	1,42	2,37	6,70	4,73	0,61	1,36
30	26,48	18,75	30,21	42,86	1,40	2,45	6,46	4,93	0,60	1,35
40	26,44	18,91	30,29	42,54	1,40	2,45	2,07	5,83	0,58	1,33
50	26,34	20,60	32,57	42,41	1,38	2,50	6,60	5,90	0,49	0,69
60	24,94	22,31	33,60	46,04	1,37	2,54	7,23	5,92	0,45	0,46
70	24,75	24,45	35,99	49,66	1,37	2,74	5,47	6,00	0,42	0,45
80	24,19	25,53	37,25	50,34	1,35	2,72	6,21	6,42	0,35	0,15
90	25,01	27,31	39,28	51,95	1,32	2,75	3,78	6,71	0,30	0,08

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_s= retração volumétrica após secagem; RV_Q= retração volumétrica após queima; σ_s = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

Tabela 19 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com LAF e argila Guandu – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _Q (%)	σ_S (MPa)	σ_Q (MPa)
5	27,53	14,90	25,35	38,57	1,52	2,40	6,77	9,33	0,46	1,61
10	27,42	16,59	25,72	38,68	1,51	2,40	7,27	9,34	0,67	2,63
20	27,22	17,03	26,00	38,92	1,51	2,40	5,72	9,93	0,71	2,68
30	27,21	19,64	27,57	39,79	1,44	2,40	5,90	10,63	0,78	3,40
40	26,97	20,14	27,69	39,98	1,44	2,40	0,84	10,78	0,83	3,48
50	25,28	22,53	29,01	41,56	1,44	2,46	3,85	10,90	0,75	2,59
60	24,65	23,14	31,07	44,21	1,42	2,55	1,87	11,01	0,70	1,38
70	24,60	24,73	32,46	46,90	1,42	2,72	6,77	11,05	0,66	1,37
80	24,15	26,08	34,78	48,50	1,39	2,72	1,72	11,25	0,50	0,38
90	25,77	28,70	37,36	51,32	1,37	2,82	1,59	11,54	0,42	0,20

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_Q= retração volumétrica após queima; σ_S = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

Tabela 20 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com LAF e argila Itapina – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _s (%)	RV _Q (%)	σ_s (MPa)	σ_Q (MPa)
5	25,95	12,90	25,27	37,52	1,50	2,41	7,85	3,72	0,54	2,00
10	25,82	14,24	25,59	37,89	1,50	2,42	7,06	4,46	0,55	1,69
20	25,65	14,90	26,79	38,66	1,47	2,43	5,03	5,27	0,66	1,60
30	25,76	18,01	30,24	42,80	1,42	2,47	9,45	6,54	0,64	1,57
40	25,75	18,36	31,69	42,91	1,41	2,48	0,73	6,65	0,58	1,18
50	25,71	21,01	31,76	43,09	1,40	2,50	5,54	6,85	0,45	0,97
60	25,40	21,33	32,26	44,48	1,40	2,52	2,93	7,24	0,43	0,41
70	25,28	23,58	34,47	48,10	1,39	2,67	7,34	7,28	0,42	0,52
80	25,18	25,46	36,80	49,12	1,34	2,67	1,71	7,52	0,35	0,23
90	26,37	28,39	40,89	50,76	1,32	2,67	5,12	7,89	0,27	0,11

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de água ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_s= retração volumétrica após secagem; RV_Q= retração volumétrica após queima; σ_s = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

4.4 Estudo da incorporação dos resíduos na massa argilosa – 2^a etapa

Após a análise da incorporação de cada resíduo a cada argila, foram conformadas esferas com a incorporação de cada resíduo à massa argilosa na 2^a etapa.

O teor da massa argilosa obedeceu a dosagem usada na fábrica de cerâmica sem a incorporação de resíduos, sendo os teores (em massa): Batinga 24%, Berta 24%, Guandu 12,5% e Itapina 39,5%. A partir daí, cada resíduo foi incorporado à massa argilosa nos teores de 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% (massa).

As Tabelas 21 a 23 apresentam os resultados encontrados para as propriedades cerâmicas e mecânicas da massa argilosa com incorporação de cada resíduo.

Na Tabela 21, que apresenta os resultados da incorporação do RBG à massa argilosa, pode-se verificar que: perda de secagem (PS), perda ao fogo (PF) e retração volumétrica de queima (RV_Q) diminuíram com o aumento do teor de resíduo melhorando assim a estabilidade dimensional em função do teor de quartzo que possui. A absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) foram mínimas no teor de 70% (massa) de RBG, enquanto a MEA e MEAS foram máximas nesse mesmo teor confirmando a máxima densificação nas esferas devido ao empacotamento físico que o RBG promove. Já, os valores de resistência à compressão nos corpos de prova secos (σ_S) e queimados (σ_Q) diminuíram com o aumento do teor de resíduo, novamente devido ao teor de quartzo do RBG, que atua como pontos de fratura nos corpos de prova. Logo, confirma-se a possibilidade de incorporar o RBG em teores até 70% (massa) na massa argilosa.

Os resultados encontrados da incorporação do RMCC à massa argilosa (Tabela 22) mostram que: perda de secagem (PS), perda ao fogo (PF), retração volumétrica de queima (RV_Q), absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) diminuíram com o aumento do teor de resíduo, enquanto a MEA aumentou, o que confirma o aumento da densificação nos corpos de prova promovido pelo RMCC, que por sua vez possui RBG na composição. A MEAS foi máxima em 70% (massa) de resíduo. A resistência à compressão nos corpos de prova secos (σ_S) foi máxima no teor de 40% (massa) de resíduo e a resistência à compressão após queima (σ_Q) foi máxima em 70% (massa) de resíduo, ambos valores aumentaram com o aumento do teor de resíduo até os teores máximos citados. O RMCC causou melhorias nas propriedades

analisadas. Logo, pode-se sugerir a incorporação de 70% a 90% de (massa) RMCC na massa argilosa.

Na Tabela 23, que apresenta os resultados da incorporação da LAF à massa argilosa, pode-se verificar que o aumento do teor de LAF causa efeitos deletérios nas propriedades analisadas. A porosidade aparente (PA) aumentou com o aumento do teor do resíduo em função da presença dos finos de coque na LAF, com isso a absorção de água (AA) e a perda ao fogo (PF) são influenciadas pela porosidade aparente (PA) e aumentam seus valores. A resistência à compressão nos corpos de prova secos (σ_s) e queimados (σ_q), retração volumétrica de secagem (RV_s) e MEA diminuíram com o aumento do teor de resíduo. Com isso, o teor de incorporação da LAF deve estar em torno de 5% (massa).

Tabela 21 - Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RBG na massa argilosa – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _Q (%)	σ_s (MPa)	σ_Q (MPa)
0	25,69	12,23	24,78	37,69	1,51	2,44	1,04	6,20	0,63	2,99
5	25,28	11,81	24,40	37,62	1,51	2,45	1,54	5,69	0,67	3,38
10	25,16	11,13	23,69	35,83	1,51	2,45	0,53	4,71	0,68	2,93
20	24,68	9,95	23,09	35,68	1,57	2,45	0,62	3,63	0,63	2,42
30	24,67	9,00	23,09	35,63	1,57	2,46	1,72	2,63	0,45	1,72
40	24,49	8,13	22,91	35,38	1,57	2,47	2,14	2,30	0,44	1,56
50	23,85	7,16	22,57	35,37	1,57	2,47	0,48	1,98	0,36	1,18
60	23,01	6,32	22,05	35,14	1,61	2,48	0,88	1,31	0,24	1,18
70	22,62	5,35	21,88	35,05	1,61	2,49	1,61	1,17	0,24	0,73
80	22,59	4,39	23,01	35,32	1,51	2,39	1,65	0,89	0,17	0,46
90	22,22	3,68	23,07	35,49	1,51	2,39	1,34	0,14	0,13	0,40

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_Q= retração volumétrica após queima; σ_s = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

Tabela 22 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com RMCC na massa argilosa – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _Q (%)	σ_s (MPa)	σ_q (MPa)
0	25,69	12,23	24,78	37,69	1,51	2,44	1,04	6,20	0,63	2,99
5	25,75	12,68	24,77	37,30	1,51	2,37	1,17	5,61	0,74	3,26
10	25,00	12,68	24,30	37,11	1,51	2,39	0,75	6,19	0,64	3,15
20	24,79	12,62	23,96	36,92	1,54	2,41	0,79	5,75	0,65	3,25
30	24,62	12,35	23,69	36,22	1,54	2,42	1,20	6,57	0,80	3,22
40	24,62	12,20	23,15	36,39	1,57	2,45	1,05	6,26	0,84	3,41
50	24,52	12,19	22,56	35,43	1,57	2,45	0,75	6,19	0,81	3,81
60	24,48	12,10	22,25	34,85	1,57	2,45	0,99	5,71	0,77	3,84
70	24,10	12,05	21,69	34,29	1,58	2,45	0,60	5,64	0,77	4,29
80	22,57	11,89	21,64	24,42	1,59	2,44	0,96	5,61	0,77	3,70
90	22,61	11,76	21,10	33,59	1,59	2,44	1,04	5,50	0,69	3,92

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_Q= retração volumétrica após seccagem; σ_s = resistência à compressão após secagem; σ_q = resistência à compressão após queima.

Tabela 23 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C com LAF na massa argilosa – valores médios

Teor de resíduo(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _Q (%)	σ_S (MPa)	σ_Q (MPa)
0	25,69	12,23	24,78	37,69	1,51	2,44	1,04	6,20	0,63	2,99
5	26,23	13,83	25,52	37,44	1,47	2,36	0,58	5,58	0,66	3,17
10	26,19	14,63	25,76	37,96	1,47	2,38	1,01	5,81	0,64	2,87
20	25,84	16,16	26,86	39,60	1,47	2,38	1,09	4,68	0,62	2,43
30	25,85	17,70	28,43	40,29	1,42	2,37	2,45	5,20	0,63	2,34
40	25,80	19,27	28,99	40,78	1,41	2,38	2,41	5,21	0,58	2,11
50	25,61	20,46	29,76	41,31	1,39	2,37	0,77	5,48	0,56	1,31
60	25,62	22,10	32,25	44,00	1,38	2,44	1,51	5,58	0,54	1,24
70	25,53	23,92	33,08	45,61	1,38	2,54	0,73	5,43	0,52	0,77
80	25,06	25,42	36,05	48,15	1,34	2,58	0,91	5,50	0,41	0,45
90	24,80	26,88	38,29	51,70	1,35	2,80	0,61	5,76	0,33	0,15

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S= retração volumétrica após secagem; RV_Q= retração volumétrica após queima; σ_S = resistência à compressão após secagem; σ_Q = resistência à compressão após queima.

4.5 Estudo da incorporação simultânea dos resíduos na massa argilosa – 3^a etapa

A Tabela 24 apresenta as dosagens da massa argilosa (100% de argila) e da massa argilosa com a incorporação simultânea dos três resíduos.

O teor inicial de incorporação de resíduos na massa argilosa obedeceu ao praticado na fábrica de 38% (massa). A partir daí, o teor de resíduo foi aumentado para 42%, 46%, 50%, 54%, 58% até 62% (massa).

A variação do teor de cada resíduo dentro do teor total de 38%(massa) foi feita seguindo a proporção entre os três resíduos usada na fábrica. Tal proporção também procurou atender aos resultados obtidos na 1^a e 2^a etapas do estudo de incorporação dos resíduos na massa argilosa, sendo a variação do teor de RBG de 50% a 70%, a variação do teor de RMCC de 70% a 90%, e a variação do teor de LAF de cerca de 5% (em massa).

Pode-se observar na Tabela 24, que o teor do RBG variou de 14% a 22,8%; no RMCC variou de 20% a 32,6% e na LAF variou de 4% a 6,6% (em massa).

Tabela 24 – Dosagens das massas argilosas industriais com incorporação dos resíduos

DOSAGEM DA MASSA ARGILOSA COM RESÍDUOS NO TEOR 38% A 62% (massa)									
Argilas (%)	Batinga	Berta	Guandu	Itapina	Resíduos (%)	RBG	RMCC	LAF	
100	24,0	24,0	12,5	39,5	0	0	0	0	
62	15,0	15,0	8,0	24,0	38	14,0	20,0	4,0	
58	14,0	14,0	7,5	22,5	42	15,5	22,1	4,4	
54	13,1	13,1	7,0	20,8	46	16,9	24,2	4,9	
50	12,1	12,1	6,5	19,3	50	18,4	26,3	5,3	
46	11,1	11,1	5,9	17,9	54	19,9	28,4	5,7	
42	10,2	10,2	5,4	16,2	58	21,4	30,5	6,1	
38	9,2	9,2	4,9	14,7	62	22,8	32,6	6,6	

As Tabelas 25 e 26 apresentam os resultados das propriedades cerâmicas e mecânicas avaliadas na mistura argilosa sem resíduo e com a incorporação

simultânea dos três resíduos nos teores de 38% a 62% (massa), além dos valores de referência estipulados por Souza Santos (1975).

A Tabela 25 apresenta os resultados encontrados com as esferas. Observa-se que a perda de secagem (PS) foi em média 23%. A perda ao fogo (PF) e a retração volumétrica de queima (RV_Q) diminuíram com o aumento do teor de resíduos. Os valores mínimos de absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) foram encontrados em 42% (massa). Os valores de MEA não sofreram alterações significativas nas dosagens contendo resíduos. As máximas resistências nas esferas secas (σ_S) e nas queimadas (σ_Q) ocorreram no teor de 46% (massa). Verifica-se com isso que a melhoria obtida na densificação e na resistência mecânica ocorreu nos teores de 42% e 46% (massa) de resíduos para as esferas.

A Tabela 26 apresenta os resultados encontrados com as barras. Observa-se que: perda de secagem (PS), perda ao fogo (PF) e retração de queima (RL_Q) diminuíram com o aumento do teor dos resíduos. A perda de secagem nas barras foi em média 10%, confirmando o teor de umidade adotado para conformação. Os valores mínimos de absorção e porosidade foram encontrados em 50% (massa) de resíduo, onde ocorreu a MEA máxima. As máximas resistências nas barras secas e nas queimadas ocorreram no teor de 46% (massa). Verifica-se com isso que a melhoria obtida na resistência mecânica e na densificação ocorreu nos teores de 46% e 50% (massa) de resíduos para as barras.

Tabela 25 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em esferas secas a 110°C e queimadas a 850°C na massa argilosa com incorporação simultânea dos 3 resíduos nos teores 0%, 38%, 42%, 46%, 50%, 54%, 58% e 62% (massa) – valores médios

Resíduos(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RV _S (%)	RV _Q (%)	σ _S (MPa)	σ _Q (MPa)
0	25,69	12,23	24,78	37,69	1,51	2,44	1,04	6,20	0,63	2,99
38	23,60	11,27	22,41	36,26	1,62	2,54	0,32	4,46	0,50	2,66
42	23,25	11,24	<u>22,15</u>	<u>35,90</u>	<u>1,62</u>	<u>2,54</u>	0,75	4,49	0,55	2,74
46	23,21	11,11	22,33	36,07	1,62	2,54	0,72	4,45	<u>0,56</u>	<u>2,76</u>
50	23,13	11,10	22,47	36,35	1,62	2,55	1,07	4,39	0,55	2,73
54	22,96	10,93	22,63	36,37	1,62	2,55	0,92	4,31	0,55	2,68
58	23,02	10,87	22,74	36,57	1,62	2,54	1,29	4,04	0,44	2,56
62	23,28	10,68	22,93	36,62	1,62	2,53	1,40	3,94	0,43	2,40

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de água; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RV_S=retração volumétrica após secagem; RV_Q=retração volumétrica após queima; σ_S=resistência à compressão após secagem; σ_Q=resistência à compressão após queima.

Tabela 26 – Propriedades cerâmicas e mecânicas em barras secas a 110°C e queimadas a 850°C na massa argilosa com incorporação simultânea dos 3 resíduos nos teores 0%, 38%, 42%, 46%, 50%, 54%, 58%, 62% (massa) – valores médios

Resíduos(%)	PS(%)	PF(%)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	MEAS(g/cm³)	RL _S (%)	RL _Q (%)	TR _S (MPa)	TR _Q (MPa)
0	11,86	12,49	25,10	40,78	1,63	2,75	0,09	1,63	1,57	4,35
38	11,00	11,20	24,42	40,69	1,64	2,77	0,04	1,21	1,50	3,24
42	10,96	11,16	23,91	39,72	1,67	2,76	0,05	1,13	1,64	3,25
46	10,61	11,27	23,58	39,55	1,69	2,79	0,01	1,13	<u>1,69</u>	<u>3,40</u>
50	10,61	11,15	<u>22,41</u>	<u>38,33</u>	<u>1,72</u>	2,78	0,02	1,10	1,30	3,07
54	10,58	11,14	22,94	39,06	1,68	2,79	0,02	1,07	1,27	2,98
58	10,50	11,06	24,02	39,13	1,67	2,79	0,01	1,03	1,15	2,90
62	10,15	11,06	24,18	40,43	1,68	2,81	0,01	0,99	1,14	2,83
REFERÊNCIA*	-	-	≤ 25	≤ 35	1,5 a 2,0*	-	-	-	0,5 a 7,0	≥ 6,0

Nota: PS=perda de massa a secagem; PF=perda de massa a queima ; AA=absorção de água; PA=porosidade aparente; MEA=massa específica aparente; MEAS=massa específica aparente da parte sólida; RL_S= retração linear após secagem; RL_Q= retração linear após queima; TR_S= tensão de ruptura à flexão após secagem; TR_Q= tensão de ruptura à flexão após queima

Nota: Dados de referência (SOUZA SANTOS, 1975, p. 205), *valores aproximados.

Os valores encontrados nas Tabelas 25 e 26 para as propriedades cerâmicas e mecânicas nas barras e nas esferas são coerentes corroborando os resultados encontrados em Reis et al. (2014a), Reis et al. (2014b) e Reis et al. (2015), nos quais também são conformadas esferas para estudos com matérias-primas argilosas.

A perda de massa após secagem (PS) nas massas argilosas contendo resíduos é menor que na massa argilosa sem resíduos, devido a presença de RBG e LAF que são materiais não plásticos e demandam menor quantidade de água para conformação que as argilas puras.

A absorção de água (AA) nas barras e nas esferas atendeu ao valor máximo de 25% em todas as dosagens com incorporação simultânea dos três resíduos.

Já a porosidade aparente (PA) nas barras não atendeu ao limite máximo de 35%. Além das matérias-primas argilosas apresentarem porosidade, a inserção da LAF (a qual contém carbono, que entra em combustão na queima promovendo calor no interior da peça) também contribui para aumentar a porosidade.

Pode se verificar também que os menores valores de absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) ocorreram nas misturas com 42% e 50% (massa) de resíduos, onde a inserção dos resíduos promoveu o aumento do empacotamento das partículas aumentando a densificação da massa cerâmica, o que se confirma com os valores máximos obtidos de MEA e MEAS nas misturas nesse intervalo. A partir daí, a incorporação dos resíduos não é mais eficaz na densificação através do empacotamento físico dos grãos. Ou seja, as dosagens com teor de resíduos acima de 50% (massa) apresentam aumento da porosidade aparente e da absorção de água, o que pode ser atribuído também ao aumento dos teores de LAF e de RBG nessas dosagens.

Nas barras, os valores de porosidade foram maiores que nas esferas, o que pode ser devido ao menor teor de umidade usado na conformação (de cerca de 10%) em relação ao teor nas esferas (de cerca de 23%). O teor de 10% pode não ter sido suficiente para lubrificar os grãos das matérias-primas permitindo acomodá-las nos vazios existentes no interior do molde das barras para assim promover o mesmo empacotamento físico. Com isso, pode-se explicar o fato da maior densificação ter ocorrido nas esferas em 42% (massa) e nas barras em 50% (massa).

A perda ao fogo (PF) e as retrações após queima (RL_Q , RV_Q) diminuíram com o aumento do teor de resíduos, tanto nas esferas quanto nas barras. Tal comportamento é devido a diminuição dos teores de argilominerais e de matéria orgânica presentes nas argilas e principalmente ao alto teor de RBG incorporado na mistura. O alto teor de sílica na forma de quartzo presente no RBG aumentou a estabilidade dimensional dos corpos de prova, fato relatado também em Taguchi et al. (2014), devido ao quartzo apresentar um comportamento inerte na queima na temperatura estudada de 850°C. Outro fato atribuído a pouca retração é a não formação completa de fase vítreia. Segundo Borlini et al. (2009), na temperatura de 850°C a densificação ocorre principalmente por difusão sólida, isso é devido ao grande número de contatos existentes entre os grãos das argilas e dos resíduos (que contém alto teor de RBG) e do empacotamento físico. Tais fatos são confirmados também nos trabalhos de Manhães, Moreira e Holanda (2009), Borlini et al. (2009) e Moreno, Bartolomeu e Lima, (2009).

Além disso, os óxidos de ferro presentes na LAF formam a hematita, a qual permanece inerte durante a queima, e assim não contribui para a sinterização na temperatura utilizada de 850°C. Tais fatos foram relatados em Carreiro e Almeida (2011) e Dias (2011).

O maior valor encontrado de tensão de ruptura à flexão (TR_s e TR_Q) nas barras e de resistência à compressão (σ_s e σ_Q) nas esferas contendo resíduos foi obtido na dosagem de 46% (massa) tanto nos corpos de prova secos quanto nos queimados. Entretanto, os valores obtidos de tensão de ruptura à flexão nas barras não atenderam ao limite mínimo de 6,0 MPa estabelecido por Souza Santos (p. 205, 1975). E no caso das esferas, comparando os valores obtidos de resistência à compressão nas massas argilosas contendo resíduos verifica-se que todos os valores são menores que o encontrado na massa argilosa sem resíduos (2,99 MPa).

Os baixos valores de resistência mecânica podem estar associados a presença de defeitos inerentes às argilas da massa argilosa, tais como, poros e a presença de quartzo. O RBG, que representa 16,9% da massa total (considerando a dosagem total de 46% de resíduos), possui óxidos fundentes, porém o caráter inerte do quartzo presente no RBG e nas argilas faz com que o quartzo permaneça praticamente inalterado na temperatura de queima estudada. Tal fato prevaleceu em relação a fundência dos feldspatos, dificultando a consolidação das partículas, o que

pode ter ocorrido apenas devido a difusão sólida, como já dito. Além disso, as temperaturas abaixo de 900°C podem não ser suficientes para completar a formação da fase vítreia não influenciando na diminuição da porosidade, fato também observado por Pinheiro e Holanda (2010). Aguiar (2012), Manhães, Moreira e Holanda (2009) também atribuem a presença do quartzo proveniente do RBG a baixa resistência mecânica dos corpos de prova cerâmicos devido ao quartzo atuar como sítio de nucleação de fratura nas peças.

O resultado encontrado também comprova a refratariedade das misturas à temperatura de queima utilizada na fábrica e no experimento, de 850°C. Verifica-se com isso a necessidade de otimizar a temperatura de queima na fábrica para abaixar o nível de porosidade e com isso resultar em aumento de resistência mecânica.

Levando em conta os resultados do estudo da incorporação dos resíduos, foi adotada a massa argilosa com 46% (massa) de resíduos para análise da microestrutura e para a produção das telhas por ter apresentado melhor resultado de resistência mecânica. Além da mistura estar contida no intervalo de 42% a 50% (massa) de resíduos onde ocorreram os menores valores de absorção de água e porosidade aparente e maior densificação (MEA máxima) nas esferas e nas barras.

4.6 Análise microestrutural na massa cerâmica final (46% de resíduos)

A análise microestrutural foi feita na massa cerâmica contendo 46% de resíduos por meio de DRX e MEV com EDS nas barras e nas esferas (Figura 37).

Figura 37 – Exemplares de barras e esferas da massa cerâmica final (46% de resíduos)



Fonte: Autora (2015)

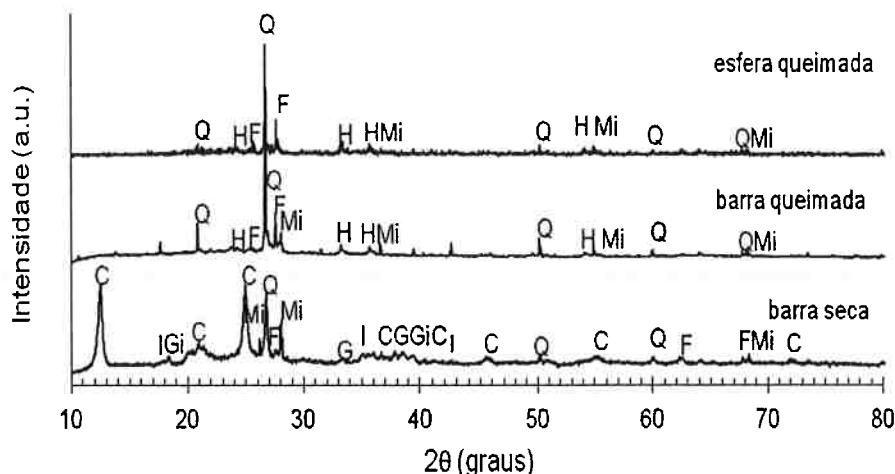
4.6.1 DRX na massa cerâmica final (46% de resíduos)

A Figura 38 apresenta o DRX da massa argilosa com 46% de resíduos feito na barra seca e na barra e esfera queimadas a 850°C.

Observa-se que na análise da barra seca, as fases predominantes são correspondentes a caulinita, quartzo e ilita. Há também o indício da presença de gibsita e goetita. Tais fases são provenientes das argilas, usadas como matérias-primas. A presença de feldspato e mica confirma a presença de alta quantidade do RBG na massa cerâmica final (46% de resíduos).

O DRX da barra e da esfera queimadas apresentou resultados bem similares. O DRX indicou a presença de mica e feldspato, provenientes do RBG, além do quartzo proveniente das argilas e do RBG; e hematita proveniente da desidratação do hidróxido de ferro presente nas argilas e da LAF. Na temperatura de queima utilizada, há provavelmente a transformação da caulinita para metacaulinita, que não aparece no DRX devido ao seu caráter amorfó.

Figura 38 – DRX da massa cerâmica final (46% de resíduos)



Nota: C - caulinita (COD 1011045); F - feldspato (COD 9001898); G - goetita (COD 1008768); Gi - gibsite (COD 1200016); H - hematita (COD 1011240); I - ilita (COD 9013718); Mi - mica (COD 9000819); Q - quartzo (COD 9012602).

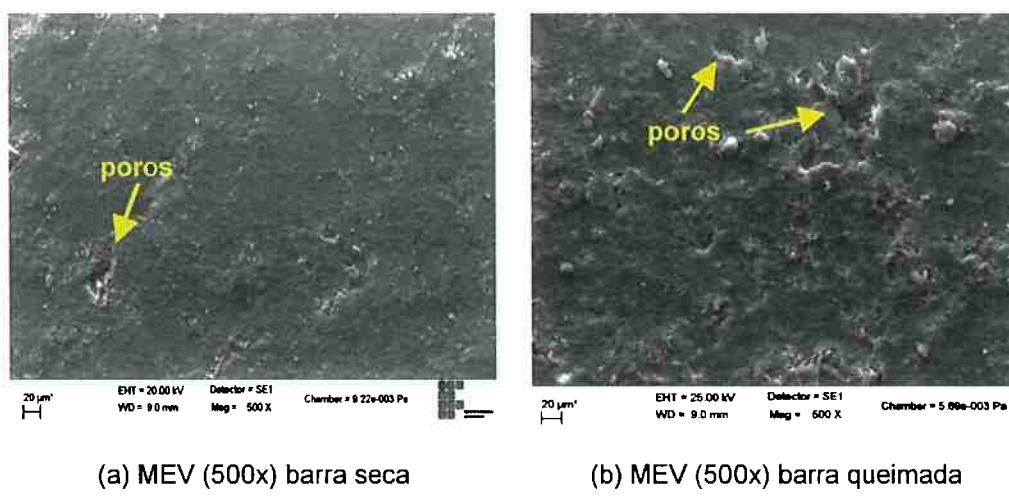
Fonte: Autora (2015)

4.6.2 MEV com EDS na massa cerâmica final (46% de resíduos)

As imagens de MEV apresentam a morfologia na barra seca (Figura 39 a) e na barra queimada (Figura 39 b). É possível observar nas imagens uma textura rugosa e

microestrutura porosa. Essa textura grosseira e heterogênea e microestrutura porosa são típicas de cerâmica argilosa caulinitica (AGUIAR, 2012) queimada na faixa de temperatura que compreende 850°C (MOREIRA; FREIRE; HOLANDA, 2003). Tais imagens confirmam as características obtidas nos corpos de prova queimados em função das argilas usadas serem cauliniticas.

Figura 39 – MEV da massa cerâmica final (46% de resíduos)



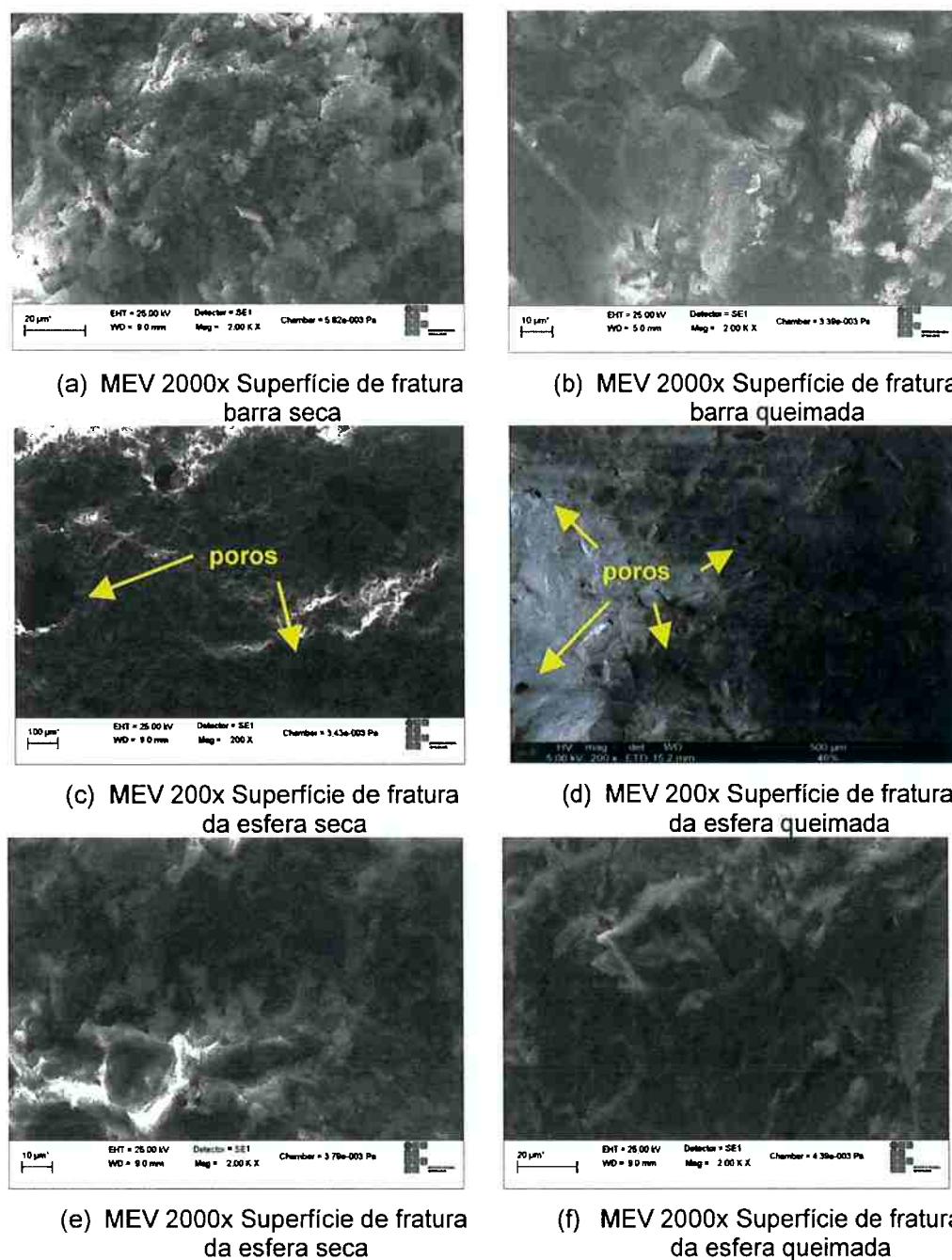
Fonte: Autora (2015)

As imagens nas superfícies de fratura da barra e da esfera são apresentadas na Figura 40. Pode-se dizer que existe alguma formação de fase líquida na barra queimada (Figura 40 b) para consolidação microestrutural da cerâmica argilosa que diminui a porosidade aberta e uniformiza a textura da superfície de fratura em comparação com a barra seca (Figura 40 a). Porém, o caráter refratário das argilas, a presença do quartzo e a combustão do carbono dificultam a redução da porosidade.

Nas Figuras 40 (c, d) que mostram imagens da superfície de fratura da esfera, pode-se observar poros na superfície tanto na esfera seca quanto na esfera queimada.

Na Figura 40 (e) a superfície de fratura da esfera seca parece ser irregular. Na Figura 40 (f), que apresenta a superfície de fratura da esfera queimada, parecem existir placas de metacaulinita amorfa ligadas durante o processo de queima.

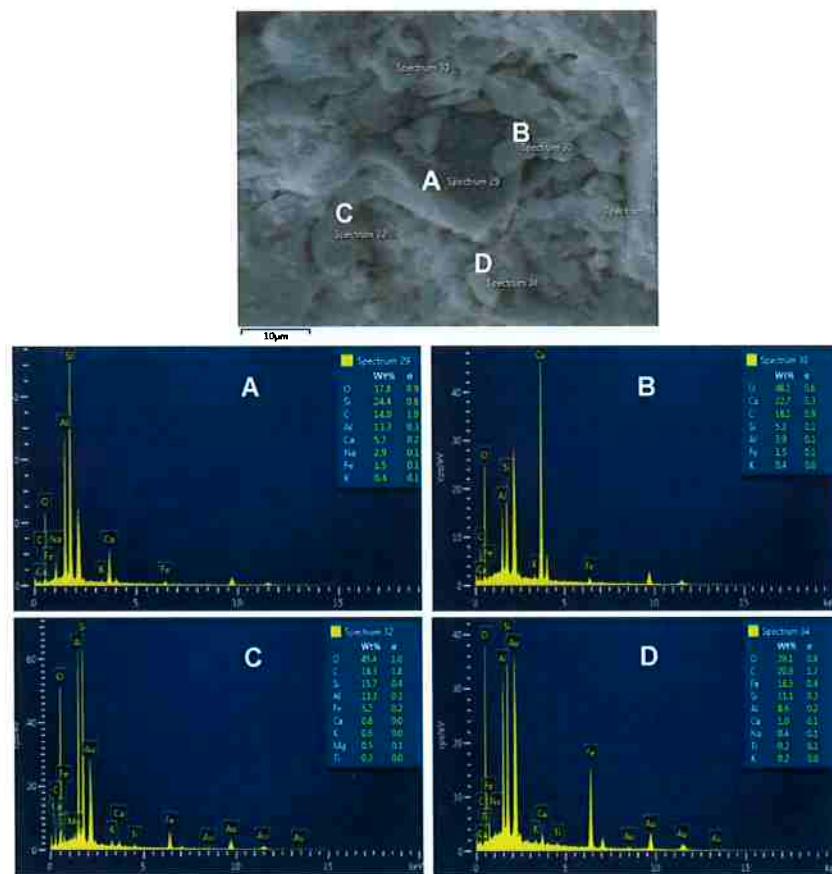
Figura 40 – MEV da massa cerâmica final (46% de resíduos) na superfície de fratura dos corpos de prova



Fonte: Autora (2015)

A Figura 41 apresenta o EDS, feito na barra queimada, que indicou a presença de sílica, alumina, oxigênio, elementos presentes nas argilas e no RBG, além do ferro e do cálcio, provenientes da incorporação do RBG, da LAF e do RMCC. Esse resultado é coerente com o apresentado no DRX.

Figura 41 – MEV com EDS da massa cerâmica final (46% de resíduos)



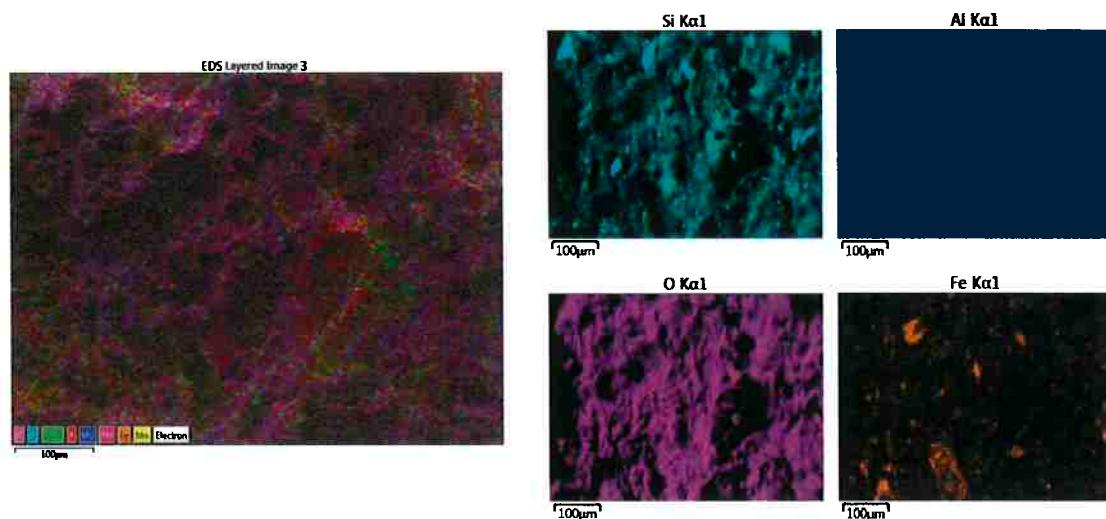
Fonte: Autora (2015)

A Figura 42 apresenta o espectro de EDS e o mapeamento da massa cerâmica com 46% de resíduos feito na barra queimada. O alto teor do oxigênio pode ser explicado, pela presença deste elemento na estrutura cristalina dos óxidos e dos silicatos que compõem as amostras.

O elemento químico Ouro (Au) está presente, pois foi utilizado para metalização das amostras.

O mapeamento por EDS apresentou picos de Si e Al, principais constituintes das argilas, formando a matriz amorfã de aluminossilicato. Si é também constituinte do RBG indicando a presença de partículas de quartzo. Além do Fe proveniente da goetita presente nas argilas e dos óxidos de ferro presentes na LAF.

Figura 42 – Mapeamento de Si, Al, O e Fe da massa cerâmica final (46% de resíduos) em barra queimada a 850°C

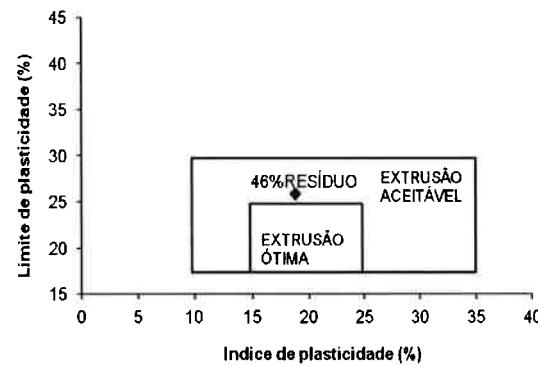


Fonte: Autora (2015)

4.7 Limites de consistência na massa cerâmica final (46% de resíduos)

A Figura 43 apresenta a localização da massa cerâmica final (46% de resíduos) em relação as regiões de extrusão ótima e aceitável. O gráfico foi feito com os valores de: limite de plasticidade 25,88% (NBR 7180/1984); limite de liquidez 44,65% (NBR 6459/1984) e índice de plasticidade 18,77% determinados para a massa cerâmica final. Verifica-se que a massa cerâmica com 46% de resíduo está na região de extrusão aceitável, confirmando ser adequado para o processo de conformação das telhas.

Figura 43 – Prognóstico de extrusão da massa cerâmica final (46% de resíduos)

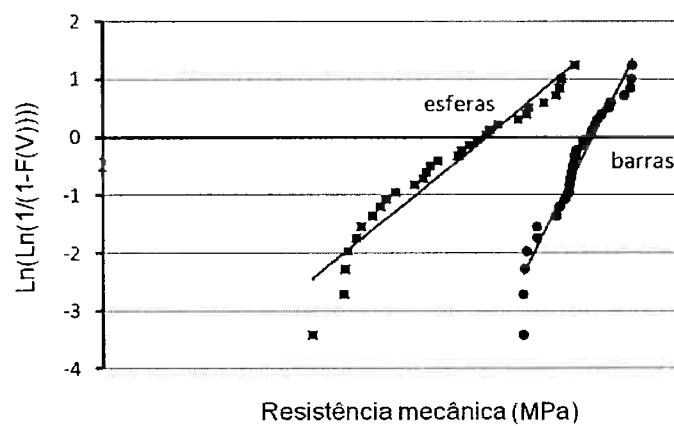


Fonte: Marsigli e Dondi (1997), p.221, adaptado

4.8 Análise estatística de Weibull na massa cerâmica final após queima (46% de resíduos)

A Figura 44 mostra o Diagrama de Weibull, $\ln(\ln(1/(1-F(V))))$ versus σ , onde “F” é a probabilidade estimada e “σ” é no gráfico das esferas a resistência à compressão e no gráfico das barras a tensão de ruptura à flexão, ambas conformadas com 46% de resíduos. As retas traçadas são médias obtidas pelo método dos mínimos quadrados (linhas de tendência).

Figura 44 – Diagrama de Weibull nas barras e esferas da massa cerâmica final (46% de resíduos)



Fonte: Autora (2015)

A Tabela 27 apresenta os valores obtidos no Diagrama de Weibull para o módulo de Weibull (m), tensão característica (σ_0) e os coeficientes de correlação linear (R) para as esferas e barras.

Tabela 27 – Valores obtidos através da análise WEIBULL

	m	σ_0 (MPa)	R
barras	28,15	3,59	0,9379
esferas	11,87	3,16	0,9309

Comparando-se os valores obtidos dos módulos de Weibull com o intervalo estabelecido de “m” de 3 a 15 para materiais cerâmicos (ZANOTTO; MIGLIORE, 1997), verifica-se que os módulos de Weibull encontrados nas barras e nas esferas são altos indicando baixa dispersão nos resultados da resistência mecânica.

Os valores de resistência dos corpos de prova com a mistura contendo 46% de

resíduos se ajustam a teoria de Weibull, pois os coeficientes de correlação obtidos tendem ao valor 1, bem como apresentam um comportamento unimodal.

4.9 Propriedades das telhas cerâmicas produzidas com massa cerâmica final (46% resíduos)

Foram fabricadas telhas, dos tipos: americana, portuguesa e romana, em escala industrial com massa cerâmica contendo 46% de resíduos (Figura 45). Os resultados das propriedades das telhas são apresentados nas Tabelas 28, 29 e 30 e foram comparados aos valores de Norma e dimensões de fabricação.

Todas as propriedades analisadas atenderam aos valores prescritos. O atendimento às características dimensionais, planaridade, retilíneidade indicam que não houve retração ou expansão na secagem e na queima das peças, e que os moldes utilizados estão adequados.

As telhas produzidas atenderam aos valores normalizados de tensão de ruptura à flexão, absorção de água, massa seca e impermeabilidade.

Figura 45 – Exemplares das telhas fabricadas



(a) Tipos de telhas



(b) Exemplares das telhas

Fonte: Autora (2015)

Tabela 28 – Propriedades da Telha Americana produzida com massa cerâmica final (46% de resíduos)

c.p.	Características dimensionais (mm)			Hp (mm)	Planaridade (mm)	Retilíneidade (mm)	Impermeabilidade canal	Carga ruptura flexão (N) 1 ^a amostra/2 ^a amostr	Absorção de água (%)	Massa ≤6% M (g)
	L	C	Lp	capa	canal	capa	canal			
1	252	435	400	7,2	4	-1	0	Ok	1439	1343
2	253	436	401	7,3	-3	1	-1	Ok	1508	1386
3	251	436	400	7,5	-1	0	-1	Ok	1212	1244
4	253	437	402	7,2	-1	1	0	Ok	1210	1687
5	254	437	401	7,2	1	2	0	Ok	2281	1835
6	254	435	399	7,1	3	-2	0	Ok	1372	1295
Média	-	-	-	-	-	-	-	-	1484	20,0
Refer.	$255\pm2\%$	$435\pm2\%$	$400\pm2\%$	≥ 7	≤ 5	$\leq 1\% C_{efet}$	Ok	≥ 1300	$\leq 20,0$	≤ 3000

Nota: c.p.=corpo de prova; L=largura; C=comprimento; $C_{efet}=435\text{mm}$ (comprimento efetivo); Lp=posição do pino ou furo de amarração; Hp=altura mínima do pino; M=massa especificada pelo fabricante; Refer.=valores de referência da NBR15310/2005 e do fabricante

Tabela 29 – Propriedades da Telha Portuguesa produzida com massa cerâmica final (46% de resíduos)

c.p.	Características dimensionais			Hp (mm)	Planaridade (mm)	Retilíneidade (mm)	Impermeabilidade canal	Carga ruptura flexão (N) 1ªamostra2ªamostr	Absorção de água (%)	Massa ≤6%M (g)
	L	C	Lp							
1	227	402	379	7,6	2	0	-1	0	Ok	1707
2	226	401	379	7,1	2	0	1	-1	Ok	1949
3	226	402	378	7,4	1	-1	-2	-1	Ok	1782
4	226	403	380	7,5	1	-1	-1	-1	Ok	1679
5	226	402	378	7,4	-2	0	0	-1	Ok	1712
6	228	404	380	7,5	0	0	1	-1	Ok	1385
Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1813
Refer.	227±2%	400±2%	382±2%	≥ 7	≤ 5	≤ 1% C _{efet}	Ok	≥ 1300	≤ 20,0	≤ 3000

Nota: c.p.=corpo de prova; L=largura; C=comprimento; C_{efet}=435mm (comprimento efetivo); Lp=posição do pino ou furo de amarração; Hp=altura mínima do pino; M=massa especificada pelo fabricante; Refer.=valores de referência da NBR15310/2005 e do fabricante

Tabela 30 – Propriedades da Telha Romana produzida com massa cerâmica final (46% de resíduos)

c.p.	Características dimensionais			H _p (mm)	Planaridade (mm)	Reticulidade (mm)	Impermeabilidade (mm)	Carga ruptura flexão (N)	Absorção de água (%)	Massa (g) ≤6%M
	L (mm)	C (mm)	L _p	capa	canal	capa	canal	1ªamostra	2ªamostr	
1	236	410	382	7,1	-1	0	-1	1	Ok	1346
2	237	410	382	7,2	-2	0	0	2	Ok	1389
3	236	408	380	7,0	1	0	-1	-1	Ok	1360
4	234	408	381	7,2	1	-1	-1	-1	Ok	1317
5	238	410	382	7,2	1	0	1	0	Ok	1382
6	235	409	380	7,1	1	-1	0	-1	Ok	1156
Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1304
Refer.	$235 \pm 2\%$	$402 \pm 2\%$	$383 \pm 2\%$	≥ 7	≤ 5	$\leq 1\% C_{refet}$	$\leq 1\% C_{refet}$	Ok	≥ 1300	$\leq 20,0$

Nota: c.p.=corpo de prova; L=largura; C=comprimento; $C_{refet}=435\text{mm}$ (comprimento efetivo); L_p=posição do pino ou furo de amarração; Hp=altura mínima do pino; M=massa especificada pelo fabricante; Refer.=valores de referência da NBR15310/2005 e do fabricante

4.10 Caracterização ambiental na massa cerâmica final (46% de resíduos)

A massa cerâmica final (46% de resíduo) foi caracterizada como um material “não perigoso e inerte”, que após queima a 850°C tornou-se “não inerte”. Com isso, as telhas produzidas com a massa cerâmica final não devem causar danos ao ser humano e ao meio ambiente.

A Tabela 31 apresenta o resultado da análise ambiental da massa cerâmica final CRUA (46% de resíduos) classificada como **NÃO PERIGOSA** (Classe II) e **INERTE** (B), ou seja, **Classe II-B**. O pH medido atingiu 7,61, caracterizando a massa cerâmica como “não corrosiva” (NBR 10004/2004).

Tabela 31 – Análise ambiental da massa cerâmica final (CRUA 46% de resíduo)

Parâmetros analisados	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato solubilizado (mg/L)	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato lixiviado (mg/L)
Alumínio	0,12	0,2	-	-
Arsênio	<0,0025	0,01	<0,0025	1,0
Bário	0,10	0,7	0,53	70,0
Cádmio	<0,0005	0,005	<0,05	0,5
Chumbo	<0,005	0,01	<0,10	1,0
Cianeto	0,010	0,07	-	-
Cloreto	23,02	250,0	-	-
Cobre	<0,10	2,0	-	-
Cromo total	<0,05	0,05	<0,05	5,0
Fenóis totais	<0,002	0,01	-	-
Ferro	0,25	0,3	-	-
Fluoreto	0,61	1,5	<0,10	150
Manganês	<0,10	0,1	-	-
Mercúrio	<0,001	0,001	<0,001	0,1
Nitrato	0,78	10,0	-	-
Prata	<0,05	0,05	<0,05	5,0
Selênio	<0,0025	0,01	<0,0025	1,0
Sódio	30,34	200	-	-
Sulfato	128,75	250	-	-
Surfactantes	0,21	0,5	-	-
Zinco	0,10	5,0	-	-
pH	7,61	-	-	-

A Tabela 32 apresenta o resultado da caracterização ambiental da massa cerâmica final (46% de resíduos) após QUEIMA, que foi classificada como **NÃO PERIGOSA** (Classe II) e **NÃO INERTE** (A), ou seja, **Classe II-A**. O pH medido atingiu 6,82, caracterizando a massa cerâmica como “**não corrosiva**” (NBR 10004/2004).

Tabela 32 – Análise ambiental da massa cerâmica final (QUEIMADA 46% de resíduo)

Parâmetros analisados	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato solubilizado (mg/L)	Resultados (mg/L)	Limite máximo no extrato lixiviado (mg/L)
Alumínio	0,12	0,2	-	-
Arsênio	0,005	0,01	<0,0025	1,0
Bário	<0,10	0,7	0,53	70,0
Cádmio	<0,0005	0,005	<0,05	0,5
Chumbo	<0,005	0,01	<0,10	1,0
Cianeto	<0,005	0,07	-	-
Cloreto	0,79	250,0	-	-
Cobre	<0,10	2,0	-	-
Cromo total	<0,05	0,05	<0,05	5,0
Fenóis totais	<0,002	0,01	-	-
Ferro	0,23	0,3	-	-
Fluoreto	0,73	1,5	<0,10	150
Manganês	0,12	0,1	-	-
Mercúrio	<0,001	0,001	<0,001	0,1
Nitrato	<0,50	10,0	-	-
Prata	<0,05	0,05	<0,05	5,0
Selênio	0,003	0,01	<0,0025	1,0
Sódio	13,85	200	-	-
Sulfato	249,31	250	-	-
Surfactantes	0,21	0,5	-	-
Zinco	3,27	5,0	-	-
pH	6,82	-	-	-

5 – CONCLUSÕES

Os resultados de caracterização mostraram que as argilas são formadas principalmente de minerais do grupo da caulinita e de quartzo, contendo altos teores de sílica e alumina. As argilas possuem granulometria com baixo teor de finos, mas apresentam plasticidade adequada para uso em cerâmica vermelha. Os resultados das propriedades cerâmicas e mecânicas mostraram que as argilas Batinga e Guandu atenderam ao limite de resistência mecânica para as argilas-padrão brasileiras, enquanto as argilas Itapina e Berta não atenderam.

O RBG pode ser considerado sílico aluminoso, possui óxidos fundentes e é um material não plástico. Promoveu melhoria na absorção de água e porosidade aparente da massa argilosa, diminuiu a retração de queima; porém diminuiu a resistência mecânica.

O RMCC, formado por todas as matérias-primas da pesquisa, possui plasticidade aceitável para extrusão. Apresentou alta resistência mecânica e atendeu aos parâmetros de absorção de água.

A LAF é composta predominantemente por óxidos de ferro, apresenta mínima plasticidade e granulometria adequada para matéria-prima argilosa. A LAF contribuiu para o aumento da absorção de água, porosidade aparente e retração após queima nas peças cerâmicas. Sua importância é devida ao seu poder calorífico que otimiza a queima na temperatura de 850°C.

Considerando o estudo realizado de incorporação simultânea dos resíduos na massa argilosa, o teor de resíduos que obteve melhor resultado na resistência mecânica foi 46%, sendo os teores de RBG de 17%, RMCC de 24% e LAF de 5% (massa).

O teste em escala industrial, apresentou resultados satisfatórios com os três tipos de telhas cerâmicas produzidas (americana, portuguesa e romana) contendo 46% (massa) de resíduos, as quais atenderam a todos os requisitos das normas. Com isso, pode-se propor a modificação da dosagem da massa cerâmica aumentando-se o teor total de resíduos de 38% para 46% (massa) na fábrica.

Confirma-se então a viabilidade técnica da incorporação simultânea do resíduo de beneficiamento de granito, da lama de alto forno e do resíduo de massa cerâmica

crua na massa argilosa, que envolve os benefícios ambientais da reciclagem, inertização dos resíduos e redução do consumo de matéria-prima argilosa na produção das telhas cerâmicas.

O trabalho apresentou uma nova metodologia de estudo de massas cerâmicas com muitos componentes por meio de ensaios com corpos de prova esféricos conformados manualmente (com grande possibilidade de serem conformados na própria indústria de cerâmica vermelha em função da facilidade da metodologia utilizada) e com barras prensadas.

Deve ser ressaltado que todos os corpos de prova da pesquisa foram submetidos ao mesmo processo de fabricação dos produtos industriais, considerando as características da fábrica de cerâmica vermelha, em especial a temperatura e a duração de queima industrial. E ao final do estudo foram feitos os testes industriais com a fabricação das telhas cerâmicas, tendo-se assim a viabilidade técnica da incorporação dos resíduos confirmada também no produto final.

Com isso, a metodologia pode ser uma alternativa para diminuir o longo caminho existente entre a pesquisa acadêmica e o setor produtivo, em especial o setor de cerâmica vermelha, concretizando a valorização dos resíduos com a transferência de tecnologia da reciclagem com a produção em larga escala.

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão sendo submetidos a um pedido de patente pela autora.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. C. **Utilização de resíduos de serragem de rocha ornamental com tecnologia de fio diamantado em cerâmica vermelha.** 2012. 117 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2012.

ARCELOR MITTAL. 2014. Disponível em: <http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/lama/lama.asp>. Acesso em: 12 ago. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). **APEX e ABIROCHAS: uma parceria de sucesso.** Informe 7/2013. São Paulo. 2013. Disponível em: <http://www.ivolution.com.br/news/upload_pdf/11645/Informe_07_2013.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2013.

_____. **Balanço das exportações, importações, produção e consumo interno brasileiro de rochas ornamentais em 2014.** Informe 01/2015. São Paulo. 2015. Disponível em: <http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/3397/Informe_01_2015.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986, 9 p.

_____. **NBR 6459:** Solo—determinação de limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984, 6 p.

_____. **NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995, 18 p.

_____. **NBR 7180:** Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984, 3 p.

_____. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004, 71 p.

_____. **NBR 10005:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004, 16 p.

_____. **NBR 10006:** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004, 3 p.

_____. **NBR 10007:** Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004, 21 p.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006, 8 p.

_____. **NBR 15310:** Componentes cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005, 47 p.

ABREU, M. M. **Reciclagem de lama de alto forno em cerâmica vermelha.** 2013. 98 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2013.

ACCHAR, W.; VIEIRA, F.A; HOTZA, D. Effect of marble and granite sludge in clay materials. **Materials Science and Engineering**, v. 419, n. 1-2, p. 306-309, março 2006.

ACCHAR, W.; DANTAS, A.P.A. Uso do resíduo de granito para melhoria das propriedades de produtos argilosos. In: 8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENIERIA MECÂNICA, código 1653, 2007, Cusco-Peru. **Anais eletrônicos...** Peru: PUCP, 2007. Disponível em: <<http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/01/01-25.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2015.

ALMEIDA, M. L. B.; MELO, G. C. B. Alternativas de usos e aplicações dos resíduos sólidos das indústrias independentes de produção de ferro-gusa do estado de Minas Gerais. In: 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, set/2001, João Pessoa. **Anais...** Paraíba: ABAS, 2001. p.1-13.

ALMEIDA, S. L. M.; PONTES, I. F. Aproveitamento de rejeitos de pedreiras e finos de serrarias de rochas ornamentais brasileiras. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 2001, Bahia. **Anais eletrônicos...** Bahia: CETEM/MCT, 2001. p. 89-110. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/1261/l_simposio_RO%20101-106.pdf?sequence=3>. Acesso em: 18 set. 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). **Setor**. 2015. Disponível em: <<http://portal.anicer.com.br/setor/>> Acesso em: 23 fev. 2015.

BILDHAUER, D. C.; BRUXEL, F. R.; SANATANA, E. R. R.; OLIVEIRA, E. C. Tijolos maciços com características refratárias a partir da incorporação de resíduo de mármore e granito. **Revista Liberato**, v.16, n.25, p.73-83, 2015. Disponível em: <[http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.16,%20n.25%20\(2015\)/08-tijolos.pdf](http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.16,%20n.25%20(2015)/08-tijolos.pdf)>. Acesso em: 27 set. 2015.

BORLINI, M. C.; PAZETO, A. A.; CORREA, J. C. G.; REIS, A. S.; CARANASSIOS, A. Characterization of waste from dimension stones processing. In: 2º INTERNATIONAL CONGRESS DIMENSION STONES, 2009. Carrara-Itália. Anais... Itália:CETEM, 2009. p. 407-410.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6ª edição. v1. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 234p.

CARREIRO, R. S., ALMEIDA, L. L. P. Geração de novos produtos cerâmicos com a incorporação de lama de alto forno. **Revista ANICER**, v.14, n. 72, Ano XIV, p. 26-32, 2011. Disponível em: <http://www.anicer.com.br/arquivos/revista/revista_72.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2013.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

COD - Crystallography Open Database. 2015. Disponível em:<<http://www.crystallography.net/>>. Acesso em 23 de fev. 2015.

DAS, B; PRAKASH, S.; REDDY, P. S. R; MISRA,V. N. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. **Resources, Conservation & Recycling**, vol. 50, n.1, p.40-57, 2007.

DE MELLO, R. M. Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha. In: 17º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2006, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: ABM , 2006. p. 2229-2240, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Aço - Sumário Mineral 2014**. Brasília. 2p. 2014. Disponível em:<<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/aco-sumario-mineral-2014>>. Acesso em: 23 fev. 2015.

DIAS, C. A. C. M. **Reciclagem de lama de alto-forno em cerâmica vermelha**. 2011. 142 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2011.

DIAZ, C. C. H. **Estudo da possibilidade de uso de lodo de esgoto e lama vermelha como matérias-primas cerâmicas**. 2013. 187 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

FASTOFSKI, D. C.; SCHAFER, M., TELES, R. D.; KULAKOWSKI, M. P., GONZALES, M. A. S., KASMIERCZAK, C. S. Metodologia de caracterização de resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material pozolânico em pasta de cimento. In: 5º FORUM MUNDIAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. 2014, São Leopoldo. RS. *Anais...* São Leopoldo: LIDE, 2014. Disponível em: <http://www.5firs.institutoventuri.org.br/arquivo/download?ID_ARQUIVO=66>. Acesso em 12 mar. 2015.

FERREIRA FILHO, H. J.; GRILLO, F. F.; NASCIMENTO, R. C.; TENÓRIO, J. A. S. Análise das propriedades de pelotas fabricadas com adição de lama de alto forno. In: 66º ABM INTERNATIONAL CONGRESS, 2011, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABM, 2011. p.82-93.

FERREIRA, L. C. **Potencial de utilização de resíduos industriais na formulação de massa de cerâmica vermelha para a fabricação de blocos de vedação**. 2012. 76 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2012.

GOUVEIA, F. P.; SPOSTO, R. M. Incorporação de chamote em massa cerâmica para a produção de blocos. Um estudo das propriedades físico-mecânicas. **Revista Cerâmica**, São Paulo, n. 55: p. 415-419. 2009.

GOMES, P. C. C.; LAMEIRAS, R. M.; ROCHA, S. R. A. G. **Obtenção de materiais a base de cimento com resíduo do estado de Alagoas: Um caminho para o desenvolvimento sustentável da construção**. Relatório Final FAPEAL-UFAL 2003/2004, Maceió, 2004.

INSTITUTO AÇO BRASIL, 2012. **A indústria do aço no Brasil / Confederação Nacional da Indústria**. Cadernos setoriais. Brasília. 50p. 2012. Disponível em: <http://www.cnisustabilidade.com.br/docs/IABR_RIO20_web.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2013.

INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014. **Relatório de sustentabilidade**. Brasília. 93p. 2014. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Relatorio%20de%20Sustentabilidade%202014%20web.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2014.

INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015. **Números de mercado**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/numeros--mercado.asp>>. Acesso em: 29 mai. 2015.

KAZMIERCZAK, C. S. **Produtos de cerâmica vermelha (cap. 18)**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E PRINCIPIOS DE CIENCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS. São Paulo. PINI. 2007

LIMA, L. H. M; REIS, S. C.; BORGES, L. R. Aproveitamento de resíduo siderúrgico em blocos cerâmicos argilosos. **Revista E-xacta**, Belo Horizonte, v.5, n.2, p.69-78. 2013. Disponível em:< <http://revistas.unibh.br/index.php/dcet/article/view/1073/612>>. Acesso em: 21 mar. 2014.

LOBATO, N.C.C. **Gerenciamento de resíduos sólidos da indústria siderúrgica**. 2014. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2014.

MALARD, A. A. M. **Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do estado de Minas Gerais**. 2009. 201 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.

MANHÃES, J.P.V.T., MOREIRA, J.M.S., HOLANDA, J.N.F. Variação microestrutural de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 55, p. 371-378, 2009.

MARSIGLI, M.; DONDI, M. Plasticita delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggiatura. **L'Industria dei Laterizi**, Faenza – Itália, v. 46, p. 214-222, 1997.

MELLO, I. S. C.; CUCHIERATO, G.; MOTTA, J. F. M.; CONSONI, Â. J.; REIS, F. A. G. V.; MUNIZ, J. M. C. **Aproveitamento dos resíduos sólidos das serrarias de rochas ornamentais e para revestimento. Estudo de caso: Emigran Pisos e Revestimentos em granitos**. IPT. São Paulo. 2006.

MENEZES, R.R.; FERREIRA, H.S.; NEVES G. DE A.; FERREIRA, H.C.. Uso de rejeitos de granitos como matérias-primas cerâmicas. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 48, n.306, Abr./ma./jun., 2002.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G.A. ; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, n. 25, p.1149–1158, 2005.

MIYAHARA, R. Y.; FURLAN, G. H. R. H.; VALENZUELA-DIAZ, F. R.; TOFFOLI, S. M. Correlação entre medidas de resistência mecânica de corpos de prova de argila conformados manualmente e por prensagem uniaxial. In: **48º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA**, 2004, Curitiba. Anais... Curitiba: ABCERAM, 2004.

MONTANI, C. XXV Relatório mármore e rochas no mundo 2014 - **Dossiê Brasil – 2014** (ABIROCHAS), São Paulo, 2014. Disponível em:<<http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/3389/DossierBrazil2014.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2015.

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

MOREIRA, J. M. S.; MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Reaproveitamento de resíduo de rocha ornamental proveniente do Noroeste Fluminense em cerâmica vermelha. (Utilization of ornamental rock waste from Northwest Fluminense in red ceramic). **Revista Cerâmica**. São Paulo, v.51, n.319, p. 180-186, Jul./Set. 2005.

MORENO, M.M.T.; BARTOLOMEU, D.; LIMA, R.H.C. Análise do comportamento de queima de argilas e formulações para revestimento cerâmico. **Revista Cerâmica**. São Paulo, v. 55, p. 286-295, 2009.

MOTHÉ FILHO, H. F. Reciclagem: o caso do resíduo sólido das rochas ornamentais. **Revista Rochas de Qualidade**. São Paulo. Ano XL. Edição 192, p.189-195, jan./fev. 2007.

MOTHÉ, A.V. **Utilização da lama de alto forno em cerâmica vermelha**. 2008. 100f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense – RJ. 2008.

NEVES, G. A.; PATRICIO, S. M. R.; FERREIRA, H. C.; SILVA, M. C. Utilização de resíduos da serragem de granitos para confecção de tijolos cerâmicos. In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 1999. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABCERAM, 1999. p. 601-612.

NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; SILVA, M. C. Potencial de utilização de resíduo da serragem de granito na fabricação de revestimentos cerâmicos – parte I. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2000. São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCERAM, 2000. p. 19901-19914.

NEVES, G. A. **Reciclagem de resíduos da serragem de granitos para uso como matéria-prima cerâmica**. 2002. 242 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2002.

NUNES, R. L. S.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Reciclagem de resíduos de granito para uso na indústria de revestimentos cerâmicos. In: 46º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2002. São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCERAM, 2002. p. 2123-2135.

NUNES, R.L.S.; FERREIRA, H.S. ; NEVES, G. de A.; SANTANA, L.N.L.; FERREIRA, H.C. Reciclagem de rejeitos de mármores e granitos utilizados em substituição a matérias primas convencionais para produção de revestimentos cerâmicos. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2003a. João Pessoa/PB. **Anais...** João Pessoa/PB: ABCERAM, 2003a. p. 25-32.

NUNES, R.L.S.; NEVES, G. de A.; SANTANA, L.N.L.; FERREIRA, H.C. Placas cerâmicas obtidas pelo processo de laminação utilizando resíduo de granito. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2003b. João Pessoa/PB. **Anais...** João Pessoa/PB: ABCERAM, 2003b. p.14-23.

OLIVEIRA, G.E.; HOLANDA, J.N.F. Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. **Revista Cerâmica**. São Paulo, v. 50, n. 314, p.75-80, abril/junho 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v50n314/21061.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2014.

OLIVEIRA, M. R. C.; MARTINS, J. Caracterização e classificação do resíduo sólido "pó de balão", gerado na indústria siderúrgica não integrada a carvão vegetal: estudo de um caso na região de Sete Lagoas/MG. **Revista Química Nova**, v.26, n.1, p. 5-9, 2003.

OLIVEIRA, F. R.; SILVEIRA, C. S.; ASSIS, P. S. Caracterização química e estudo de possíveis aplicações para a lama gerada em alto forno. In: 5º ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA QUÍMICA, 2012, Maceió/Alagoas. **Anais...** Maceió: ABQ, 2012. Disponível em: <<http://www.abq.org.br/entequi/2012/trabalhos/50/50-81-13307.html>>. Acesso em: 26 jun. 2013.

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

PONTES, I.; STELLIN JR, A. Utilização de finos de serrarias do Espírito Santo nas Indústrias de construção civil. In: JORNADAS IBERMAC. 2001. Espanha. **Anais...** Madri/Espanha: CETEM, 2001.

PONTES, I.; STELLIN JR, A. Reciclagem de finos gerados em teares de serrarias. In: II SEMINÁRIO SOBRE FINOS DE BRITAGEM: O USO DA FRAÇÃO FINA DA BRITAGEM, 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2005. CD-ROM.

PRADO, C. M. O. **Caracterização química e mineralógica das argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha no estado de Sergipe**. 2011. 62 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2011.

REDIVO, I. M. **Utilização de resíduo de cerâmica vermelha em misturas com solo para construção de camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego**. 2011. 160 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

REIS, A. S.; ALVAREZ, C. E. A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais. In: II ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS – ELECS, 2007, Mato Grosso do Sul. **Anais...** Mato Grosso do Sul: ANTAC, 2007. CD-ROM.

REIS, A. S.; DELLA-SAGRILLO, V. P., OLIVEIRA, J. N.; VALENZUELA-DIAZ, F. R. Caracterização de argila usada em massa de cerâmica vermelha. In: 58º

CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2014. Rio Grande do Sul. **Anais...**
Bento Gonçalves/Rio Grande do Sul, 2014a.

REIS, A. S.; DELLA-SAGRILLO, V. P., ALEIXO, F. C.; VALENZUELA-DIAZ, F. R. Estudos das características de argila para utilização em cerâmica estrutural. In: 58º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2014. Rio Grande do Sul. **Anais...**
Bento Gonçalves/Rio Grande do Sul, 2014b.

REIS, A. S.; DELLA-SAGRILLO, V. P.; VALENZUELA-DIAZ, F. R. Caracterização de resíduo de massa cerâmica crua para aproveitamento em cerâmica vermelha. In: 70º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2015. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABM, 2015.

RIBEIRO, K. F. S.; GONÇALVES W.P.; MORAIS, C.G.C; SANTANA, L.N.L. Utilização do resíduo de granito em massas cerâmicas empregadas na obtenção de revestimento. In: 51º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2007. Bahia. **Anais eletrônicos...** Bahia: ABCERAM, 2007. Disponível em:
<http://www.abceram.org.br/51cbc/artigos/51cbc-14-12.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2008.

RODRIGUES, D.V.; XAVIER, G.C.; SABOYA, F.; MAIA, P.C.A.; ALEXANDRE, J. Durabilidade de peças cerâmicas vermelhas com adição de rejeito de rocha ornamental isenta de granalha. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 58, p. 286-293. 2012.

SALES JR, J. C. C. **Avaliação da potencialidade de argilas de queima clara como matérias-primas para o desenvolvimento de novos produtos cerâmicos.** 2008. 94 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

SANTOS, R. C.; SANTANA, L.N.L.; MACEDO, R.S.; SILVA, B.J.; GONÇALVES, W.P.; RIBEIRO, M.C.R. Formulação de massas cerâmicas para a produção de telhas. In: 20º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS, 2012. Joinvile/SC. **Anais...** Santa Catarina: ABM, 2012. Disponível em: <http://www.cbecimat.com.br/trabalhos-completos-cbecimat.php>. Acesso em: 26 jun. 2013.

SEGADÃES, A. M.; CARVALHO M. A.; ACCHAR, W. Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. **Applied Clay Science**, 11p., 2005.

SILVA, J. B.; HOTZA, D.; SEGADÃES A. M. ; ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 51, p. 325-330, 2005.

SILVA, C. S. W. **Avaliação ambiental decorrente do uso agrícola de resíduos de sistema de limpeza de gases de uma indústria siderúrgica a carvão vegetal.** 2007. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2007.

SIMON, C.; DEFRIES, R. S. **Uma terra, um futuro.** Tradução: Maria Claudia Santos Ribeiro Ratto. São Paulo: Makron Books, 1992. 189 p.

SOUZA, A. J; PINHEIRO, B. C. A; HOLANDA, J. N. F. Efeito da adição de resíduo de rocha ornamental nas propriedades tecnológicas e microestrutura de piso cerâmico vitrificado. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 57, p. 212-218, 2011.

SOUZA SANTOS, P. **Tecnologia das argilas, aplicada as argilas brasileiras.** 2 volumes. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda. 1975. 1089 p.

TAGUCHI, S. P.; SANTOS, J. C.; GOMES, T. M.; CUNHA, N. A. Evaluation of technological properties of red ceramics incorporated with dimension Stones waste from diamond wire loom. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v.60, p. 291-296, 2014.

TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; AGATHOPOULOS, S.; TULYAGANOV, D. U.; FERREIRA, J. M. F. Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations. **Journal of the European Ceramic Society**, n. 24, p. 3177–3185, 2004.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos.** 2005. 107 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2005.

VIEIRA, F. A. **Processamento e caracterização de materiais cerâmicos obtidos através da incorporação de resíduos de mármore e granito provenientes das indústrias do RN.** 2004. 132 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2004.

VIEIRA, C. M. F.; PEÇANHA, L. A.; MONTEIRO, S. N. Efeito da incorporação de resíduo de serragem de granito em massa de cerâmica vermelha. **Vértices**. Ano 5. n.3, p.143-157, set/dez 2003. Disponível em: <<http://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/1809-2667.20030024/114>>. Acesso em: 18 set. 2015.

VIEIRA, C.M.F.; SALES, H.F.; MONTEIRO, S.N. Effect of illitic flux clay addition in red ceramic of kaolinitic clays. **Revista Cerâmica**, São Paulo, n. 50, p. 239-246, 2004.

VIEIRA, C.M.F.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S.N. Ceramic bodies for roofing tiles: characteristics and firing behavior. **Revista Cerâmica**, São Paulo, n. 49, p. 245-250, 2003.

VIEIRA, C. M. F.; DIAS, C.A.C.M.; MOTHÉ, A.V.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N. Incorporation of blast furnace sludge into red ceramic. **Revista Cerâmica**, São Paulo, n. 53, p. 381-387, 2007.

VIEIRA, C.M.F.; PINHEIRO, R.M. Evaluation of kaolinitic clays from Campos dos Goytacazes used for red ceramic fabrication. **Revista Cerâmica**, São Paulo, n. 57, p. 319-323, 2011.

VIEIRA, C. M. F.; ABREU, M. M.; RITER, A. V.; VERNILLI, F. Reciclagem de lama de alto forno beneficiada em cerâmica vermelha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS, 2012, Joinville-SC. **Anais...** Santa Catarina: ABM, 2012. Disponível em: <http://cbecimat.com.br/resumos/trabalhos_completos/115-115.doc>. Acesso em: 27 jun. 2013.

XAVIER, G. C.; ALBUQUERQUE J, F. S.; ALEXANDRE, J. Otimização por planejamento factorial 3² dos ensaios físicos-mecânicos das misturas de resíduo de granito na massa cerâmica vermelha moldados por prensagem. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2003. João Pessoa/PB. 2003. **Anais...** João Pessoa/PB: ABCERAM, 2003. p.180-187.

ZANOTTO, E. D.; MIGLIORE, A. R. Jr. Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: Uma introdução. **Revista Cerâmica**, São Paulo, n. 37(247), p. 7-16, 1991.

WEIBULL, W. **A statistical theory of strength of materials**. R. Swedish Inst. Eng. Res. Proc., 151, 1939, p. 45.

WEKY SILVA, C. S. **Avaliação ambiental decorrente do uso agrícola de resíduos do sistema de limpeza de gases de uma indústria siderúrgica a carvão vegetal**. 2007. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2007.