

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS  
MESTRADO EM TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

**MARIA CATARINA MENEGUCCI LOUGON**

**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO PROVENIENTE DA LAMA DO  
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS NAS PROPRIEDADES  
FÍSICAS DE MASSAS CERÂMICAS**

Vitória  
2018

MARIA CATARINA MENEGUCCI LOUGON

**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO PROVENIENTE DA LAMA DO  
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS NAS PROPRIEDADES  
FÍSICAS DE MASSAS CERÂMICAS**

Dissertação apresentada à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Sustentáveis do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. André Gustavo de Sousa Galdino

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Carla Therezinha Dalvi Borjaille Alledi

Vitória

2018

(Biblioteca Nilo Peçanha do Instituto Federal do Espírito Santo)

L887a Lougon, Maria Catarina Menegucci.

Avaliação da incorporação do resíduo proveniente da lama do beneficiamento de rochas ornamentais nas propriedades físicas de massas cerâmicas / Maria Catarina Menegucci Lougon. – 2018.

95 f. : il. ; 30 cm

Orientador: André Gustavo de Sousa Galdino.

Coorientador: Carla Therezinha Davi Borjaille Alledi.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis, Vitória, 2018.

1. Rochas ornamentais . 2 . Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) . 3. Argila . 4 . Cerâmica . 5 . Resíduos . I. Galdino, André Gustavo de Sousa . II. Alledi, Carla Therezinha Davi Borjaille . III. Instituto Federal do Espírito Santo. IV. Título.

CDD: 628.445

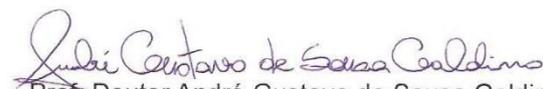
**MARIA CATARINA MENEGUCCI LOUGON**

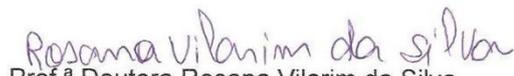
**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO PROVENIENTE DA LAMA DO  
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS NAS PROPRIEDADES  
FÍSICAS DE MASSAS CERÂMICAS**

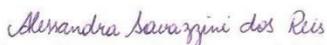
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Sustentáveis do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Sustentáveis.

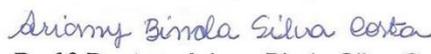
Aprovada em 30 de agosto de 2018

**COMISSÃO EXAMINADORA**

  
Prof. Doutor André Gustavo de Sousa Galdino  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Orientador

  
Prof.<sup>a</sup> Doutora Rosana Vilarim da Silva  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Membro Interno

  
Prof.<sup>a</sup> Doutora Alessandra Savazzini dos Reis  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Membro Externo

  
Prof.<sup>a</sup> Doutora Ariany Binda Silva Costa  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Membro Externo

Ao meu marido, Lourival, e aos meus filhos, Clara, Geraldo e Luiza, pelo amor de sempre, pelo apoio e pela compreensão nos momentos difíceis.

À minha mãe, Irany, pela serenidade e sabedoria transmitidas.

Aos meus irmãos que sempre valorizam minhas conquistas.

Aos meus sobrinhos pelo incentivo e pelas orientações.

A todos meus familiares e amigos que de alguma maneira participaram desse processo.

Ao meu pai, *in memoriam*, quem sempre se orgulhou de mim.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por sempre me mostrar o melhor caminho a seguir e me encorajar.

Aos meus familiares, especialmente, meu marido, filhos e minha mãe, pelo carinho, compreensão e amor.

Ao meu orientador, professor Dr André Gustavo de Sousa Galdino pelo valioso acompanhamento nas diversas etapas de desenvolvimento dessa pesquisa e pela tranquilidade e sabedoria transmitidas em todos os momentos.

À minha coorientadora, professora Dra Carla Therezinha Dalvi Borjaille Alledi pela disposição em atender-me para buscarmos uma produção melhor.

A todos os professores e colaboradores do PPGTECS pelos ensinamentos oferecidos, em especial, ao professor Dr Kingliston, pela valiosa ajuda nos ensaios de análise térmica.

À amiga e professora Dr<sup>a</sup> Ariany Binda, da Universidade Federal do Espírito Santo, campus Alegre, pelas orientações concedidas.

Aos meus sobrinhos Lucas e Lorena pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus colegas de trabalho Julio e Lilian, pelos conhecimentos legados.

Aos amigos do programa de pós-graduação, especialmente os amigos da linha 2, Ana, Jeniffer, Lívia, Ricardo, Thais e Vinícius pelos bons momentos que passamos juntos e pelo aprendizado compartilhado.

Às alunas do curso de edificações do IFES, Julia, Juliana e Sara, por contribuírem na realização de ensaios laboratoriais.

Aos técnicos de laboratório do IFES, Claudio e Ricardo pela valiosa colaboração na realização de ensaios.

À Universidade Federal de Campina Grande, pela realização do ensaio de FRX.

À indústria cerâmica Adélio Lubiana, localizada em Nova Venécia - ES, por fornecer as argilas para realização dos ensaios e pela gentileza em apresentar o processo produtivo industrial.

Ao Centro de Tratamento de Resíduos de Nova Venécia - ES pelo fornecimento do resíduo e informações fornecidas.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo por proporcionar essa oportunidade.

Finalmente, agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a efetiva realização deste trabalho.

## RESUMO

O crescimento industrial e o desenvolvimento das sociedades vêm provocando aumento da geração de resíduos e degradação ambiental. Aliada a esse processo de desenvolvimento surge uma tendência de buscas de alternativas para o reaproveitamento dos resíduos gerados. Pesquisas objetivando a inserção desses resíduos em materiais cerâmicos são, atualmente, realizadas e uma das razões é o fato desse ramo industrial ter grande potencial para absorvê-los. Nesse contexto, o presente trabalho visa verificar a potencialidade de uso do resíduo proveniente da lama do beneficiamento da indústria de rochas ornamentais, subproduto abundante e de difícil descarte, como matéria-prima para compor a massa cerâmica que, dentre outras aplicações, é utilizada na fabricação de revestimentos, blocos, telhas e tijolos. O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais foi incorporado à massa cerâmica como substituto parcial da argila menos plástica de uma mistura padrão, utilizada em uma indústria cerâmica situada no noroeste do estado do Espírito Santo. A caracterização das matérias-primas, argilas e resíduo, foi feita utilizando as técnicas de difração de raios-X, fluorescência de raios-X, microscopia eletrônica de varredura, análise termogravimétrica, calorimetria exploratória diferencial, análise granulométrica e índice de plasticidade. Misturas contendo argilas e resíduo foram elaboradas e a partir delas, corpos de prova, em matrizes cilíndricas, foram moldados por compressão uniaxial. A sinterização dos corpos de prova foi realizada em temperaturas similares às usadas nas indústrias do ramo de cerâmica vermelha, 850°C, 900°C e 950°C. Ensaio físicos foram realizados para determinação dos índices de absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, retração linear de queima e tensão de ruptura. Foi feita análise dos resultados com objetivo de identificar os possíveis *outliers*, eliminando os cinco mais dispersos. Os resultados mostram que é viável a utilização do resíduo como substituto parcial da argila menos plástica na produção de massa cerâmica para confecção de produtos da indústria de cerâmica vermelha, indicando melhora na extrusão e diminuição da retração linear de queima do corpo de prova cilíndrico cerâmico ensaiado, atendendo ao exigido pela norma ABNT NBR 15270-1: 2017, que regulamenta blocos cerâmicos, resguardando, porém, a importância de observância de norma específica para os demais produtos de cerâmica vermelha.

Palavras-chave: Argila. Cerâmica vermelha. Resíduo. Rochas ornamentais.

## ABSTRACT

The waste and environmental degradation has been growing over the years due to social and industrial harsh development. Aligned to this alarming growth, there is a tendency leaning towards ways of reusing these waste materials in order to reduce the environmental impact. Researches aiming to introduce this waste in ceramic materials are being carried out since ceramics niche still has great potential to absorb it. Therefore, this work aims at verifying the potential use of the residue from the mud that comes from the ornamental rocks industry, an abundant and hard to discard byproduct, as raw material to compose the ceramic mass, which is used in the manufacture of coatings, blocks, tiles and bricks, among other applications. The waste from ornamental rocks processing was added into the ceramic mass as a partial substitute of the less plastic clay in a standard mixture, used in a ceramic industry located in the northwest of Espírito Santo. The characterization of the raw materials, clays and waste, was made by X-ray diffraction, X-ray fluorescence, scanning electron microscopy, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry, particle size distribution analysis and plasticity index. Mixtures containing clays and residue were elaborated and from them, specimens in cylindrical matrices were molded by uniaxial compression. The sintering of the specimens was carried out at temperatures similar to those used in the red ceramic industry, 850°C, 900°C and 950°C. Physical tests were performed to determine the water absorption indexes, apparent porosity, apparent specific mass, linear burnout refraction and tensile strength. An analysis was made of the final results after eliminating the 5 most random outcomes, aiming at identifying possible outliers. The experimental results obtained showed that it is feasible to use the residue as a partial substitute of less plastic clay in the production of ceramic mass for the manufacture of red ceramic products, indicating improvement in the extrusion and reduction of the linear shrinkage of the cylindrical ceramic specimen tested, complying with the requirements of ABNT NBR 15270-1: 2017, which regulates ceramic blocks, while safeguarding the importance of observing the specific standards for others red ceramic products.

Keywords: Clay. Red ceramics. Waste. Ornamental stone.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais estados brasileiros exportadores em 2017 (US\$ 1.000).....	31
Figura 2 - Jazida de granito.....	32
Figura 3 - Jazida de granito - Nova Venécia / ES.....	32
Figura 4 - Lagoas de sedimentação de resíduos .....	33
Figura 5 - Polpa abrasiva no processo de serragem do bloco de granito .....	34
Figura 6 - Esquema do processo de geração de resíduos nas indústrias de rochas ornamentais .....	35
Figura 7 - Centro de Tratamento de Resíduos de Nova Venécia – ES .....	36
Figura 8 - Centro de Tratamento de Resíduos de Nova Venécia – ES/ Aterro .....	37
Figura 9 - Imagem das argilas no pátio da empresa fornecedora do material.....	48
Figura 10 - Imagens do RBRO - local do aterro no CTR de Nova Venécia - ES.....	48
Figura 11 - Fluxograma experimental para o desenvolvimento da pesquisa .....	50
Figura 12 - Argila A (prateleira superior), argila B (prateleira intermediária) e RBRO (prateleira inferior) .....	51
Figura 13 - Beneficiamento das argilas .....	52
Figura 14 - Matérias-primas a serem homogeneizadas .....	52
Figura 15 - Ensaio para determinação do LL .....	54
Figura 16 - Massa cerâmica umedecida e homogeneizada para confecção dos corpos de prova e moldes utilizados .....	56
Figura 17 - Prensa utilizada para moldagem dos CPs - CPs moldados e identificados.....	56
Figura 18 - Pesagem dos corpos de prova úmidos .....	58
Figura 19 - Curva granulométrica da argila A.....	61
Figura 20 - Curva granulométrica da argila B.....	62
Figura 21 - Curva granulométrica do RBRO.....	62
Figura 22 - Difratoograma de raios X da argila A .....	65
Figura 23 - Difratoograma de raios X da argila B .....	66
Figura 24 - Difratoograma de raios X do RBRO .....	66
Figura 25 - Curvas DSC/ATG para análise do comportamento térmico da Argila A ..	68
Figura 26 - Curvas DSC/ATG para análise do comportamento térmico da Argila B ..	69
Figura 27 - Curvas ATG/ DSC para análise do comportamento térmico do resíduo ..	70
Figura 28 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da argila A.....	72

Figura 29 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da argila B.....	73
Figura 30 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do RBRO.....	73
Figura 31 - Curvas granulométricas dos traços: (a) TR; (b) T1; e (c) T2.....	75
Figura 32 - Prognóstico de extrusão das massas cerâmicas de acordo com Santos <i>et al.</i> (2012) .....	76
Figura 33 - Curvas DSC/ATG para análise do comportamento térmico de TR .....	77
Figura 34 - Curvas DSC/ATG para análise do comportamento térmico de T1.....	77
Figura 35 - Curvas ATG/ DSC para análise do comportamento térmico de T2.....	78
Figura 36 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do traço TR ...	79
Figura 37 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do traço T1....	79
Figura 38 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do traço T2....	79
Figura 39 - Absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, retração linear de queima, limite de resistência à compressão .....	83

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Principais propriedades dos componentes constituintes das argilas .....	25
Quadro 2 - Classificação dos resíduos quanto à periculosidade.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição granulométrica para produção de cerâmica vermelha.....	24
Tabela 2 - Percentual de resíduo gerado no beneficiamento de rochas ornamentais.....	35
Tabela 3 - Composição química do resíduo de rochas ornamentais.....	37
Tabela 4 - Composição dos traços (% em volume).....	52
Tabela 5 - Classificação granulométrica – Rochas e solos.....	63
Tabela 6 - Plasticidade das argilas A e B.....	64
Tabela 7 - Resultados das análises químicas das matérias-primas em estudo.....	71
Tabela 8 - Distribuição de tamanho de partículas dos traços em estudo.....	74
Tabela 9 - Limites de Atterberg e índice de plasticidade dos traços TR, T1 e T2....	76
Tabela 10 - Resultados da umidade e da RLS obtidos para os três traços estudados.....	80
Tabela 11 - Propriedades física e mecânica para os traços TR, T1 e T2.....	81
Tabela 12 - Especificações para CPs queimados à temperatura de 950°C.....	81
Tabela 13 - Resistência mínima à compressão e absorção de água de blocos cerâmicos para alvenaria de vedação.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS

<i>et al.</i>	e outros, e colegas, e colaboradores
mm	Milímetro
μm	micrometro
MPa	Megapascal
p.	Página
v.	Volume
°C	Grau Celsius

## LISTA DE SIGLAS

AA	Absorção de água
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABEOC	Associação Brasileira de Empresas de Eventos
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de rochas ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATD	Análise térmica diferencial
ATG	Análise termogravimétrica
CPs	Corpos de prova
CTR	Centro de Tratamento de Resíduos
DRX	Difração de raios X
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
ES	Espírito Santo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFES	Instituto Federal do Espírito Santo
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
LRC	Limite de resistência à compressão
MEA	Massa específica aparente
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
PA	Porosidade aparente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPGTECS	Programa de Mestrado Profissional em Tecnologias Sustentáveis
RBRO	Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais
RLS	Retração Linear de Secagem
RLQ	Retração Linear de Queima
TR	Traço de Referência
T1	Traço 1
T2	Traço 2
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	18
2.1	OBJETIVO GERAL .....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
3.1	MATERIAIS CERÂMICOS .....	19
3.1.1	<b>Cerâmica vermelha</b> .....	20
3.1.2	<b>Massas utilizadas na produção de cerâmica vermelha</b> .....	21
3.1.3	<b>Argila para a indústria de cerâmica vermelha</b> .....	22
3.1.4	<b>Produção de cerâmica vermelha</b> .....	25
3.2	ROCHAS ORNAMENTAIS.....	29
3.2.1	<b>Conceito, evolução do uso e processo produtivo</b> .....	29
3.2.2	<b>Evolução da indústria</b> .....	30
3.2.3	<b>Geração de resíduos no beneficiamento de rochas ornamentais</b> ...	33
3.2.3.1	Composição química do resíduo de rochas ornamentais.....	37
3.3	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	38
3.3.1	<b>Visão geral</b> .....	38
3.3.2	<b>Definição e classificação</b> .....	38
3.3.3	<b>Classificação do resíduo de rochas ornamentais</b> .....	39
3.3.4	<b>Incorporação de resíduos sólidos em massas cerâmicas</b> .....	40
3.3.5	<b>Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais incorporado em matrizes cerâmicas</b> .....	42
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	47
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	47
4.1.1	<b>Argilas</b> .....	47
4.1.2	<b>Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais</b> .....	48
4.2	MÉTODOS .....	48
4.2.1	<b>Planejamento dos experimentos</b> .....	49
4.2.2	<b>Programa experimental</b> .....	49
4.3	EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	51
4.3.1	<b>Beneficiamento das matérias-primas</b> .....	51

<b>4.3.2</b>	<b>Determinação dos traços .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Caracterização das Matérias-Primas e dos traços estudados .....</b>	<b>53</b>
4.3.3.1	Caracterização física.....	53
4.3.3.1.1	<i>Análise granulométrica.....</i>	53
4.3.3.1.2	<i>Plasticidade.....</i>	53
4.3.3.2	Análise mineralógica .....	54
4.3.3.3	Análise térmica (DSC/ATG) .....	55
4.3.3.4	Análise química .....	55
4.3.3.5	Análise morfológica .....	55
<b>4.3.4</b>	<b>Confecção dos corpos de prova.....</b>	<b>55</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Sinterização dos corpos de prova .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Caracterização física e mecânica dos corpos de prova .....</b>	<b>57</b>
4.3.6.1	Absorção de água (AA) .....	57
4.3.6.2	Porosidade aparente (PA) .....	58
4.3.6.3	Massa específica aparente (MEA) .....	58
4.3.6.4	Umidade (h) .....	59
4.3.6.5	Retração linear após secagem (RLS) .....	59
4.3.6.6	Retração linear após a queima (RLQ).....	60
4.3.6.7	Limite de resistência à compressão (LRC).....	60
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>61</b>
5.1	MATÉRIAS-PRIMAS .....	61
<b>5.1.1</b>	<b>Análise física .....</b>	<b>61</b>
5.1.1.1	Curva granulométrica .....	61
5.1.1.2	Plasticidade .....	64
<b>5.1.2</b>	<b>Análise mineralógica .....</b>	<b>64</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Análise térmica - Curvas DSC/ATG .....</b>	<b>67</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Análise química .....</b>	<b>70</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Análise morfológica .....</b>	<b>72</b>
5.2	TRAÇOS ESTUDADOS TR, T1 E T2.....	73
<b>5.2.1</b>	<b>Análise granulométrica.....</b>	<b>74</b>

5.2.2	Análise da plasticidade.....	76
5.2.3	Análise térmica.....	77
5.2.4	Análise morfológica.....	78
5.3	CORPOS DE PROVA.....	80
5.3.1	Caracterização física e mecânica.....	80
6	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>86</b>
6.1	CONCLUSÕES.....	86
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>88</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na busca por mais conforto e melhor qualidade de vida, as atitudes cotidianas vêm proporcionando grandes transformações e progressos, porém, na maior parte da história, o homem não tem conseguido aliar o desenvolvimento requerido à sustentabilidade do meio ambiente, tornando os recursos naturais cada vez mais escassos e raros, além de aumentar o volume de resíduos na natureza. A indústria da construção civil, ao mesmo tempo, que assume papel importante no desenvolvimento mundial, também é responsável por grande parte dos resíduos gerados, impactando, negativamente, o meio ambiente.

A indústria de rochas ornamentais, inserida no setor da construção civil, é forte na economia mundial, na qual o Brasil ocupa a terceira posição dentre os maiores exportadores de granito. Esse segmento da indústria é muito importante para a economia do Brasil e, conseqüentemente, do estado do Espírito Santo, que responde por 50% da produção nacional de rochas ornamentais e por mais de 70% das exportações brasileiras. O parque industrial do estado é composto por mais de mil empresas e conta com cerca de 1200 teares dos 1500 instalados no Brasil (SMITH, LAUREN – CENTROROCHAS, 2018).

No entanto, o processo de desdobramento e beneficiamento dessas rochas gera grande quantidade de resíduo prejudicando o meio ambiente. A inserção dos resíduos provenientes desse processo num ciclo produtivo pode representar uma opção de recuperação alternativa desses materiais, que pode ser interessante tanto no aspecto ambiental, como no social e no econômico, reiterando uma tendência atual de busca de alternativas para o reaproveitamento de resíduos.

Seguindo essa linha de pensamento surge a possibilidade de impulsionar a indústria cerâmica como absorvedora desse resíduo. Esse ramo industrial possui grande potencial para inserir resíduos sólidos em seu processo produtivo, uma vez que seu volume de produção é elevado, a matéria prima natural utilizada na fabricação dos produtos cerâmicos à base de argila mostra grande variação na sua composição e as particularidades dos processamentos cerâmicos facilitam a incorporação desse material.

Menezes, Neves e Ferreira (2002) afirmam que a indústria cerâmica é uma das poucas atividades industriais que pode obter vantagens econômicas com a incorporação de resíduos em seu processo de produção, reduzindo o consumo de energia e de matérias-primas virgens cada dia mais escassas e raras, além da capacidade de neutralizar resíduos tóxicos.

A importância da incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em massas cerâmicas é também avaliada por Moreira, Freire e Holanda (2003). Eles pontuam alguns aspectos importantes, como, por exemplo, composição químico-mineralógica semelhante entre argila e resíduo; natureza não plástica do resíduo; e não incorporação de poluição adicional durante a fabricação e uso dos novos produtos cerâmicos obtidos.

Marinho, Rocha e Galdino (2017) citam a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada em 1992, alertando para a necessidade de desenvolvimento sustentável e apontam a utilização do resíduo de rochas ornamentais em processos produtivos como alternativa para evitar disposição inadequada desse resíduo.

Diante do exposto e visando dar um destino nobre ao resíduo produzido pelas indústrias de rochas ornamentais, de forma a minimizar os impactos ambientais, causados pelo descarte inadequado desses resíduos e pelos elevados índices de crescimento do setor é que surge o questionamento a ser respondido por este trabalho: É viável a utilização do resíduo proveniente da lama do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) como substituto parcial da argila menos plástica de uma mistura padrão para confecção de produtos voltados para a indústria de cerâmica vermelha?

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência nas propriedades físicas e mecânicas de uma massa cerâmica vermelha, resultante da substituição de parte da argila menos plástica da massa pelo RBRO.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física, mineralógica, química e morfológicamente as argilas e o RBRO;
- Avaliar a influência do resíduo na plasticidade da massa cerâmica obtida;
- Verificar se os diferentes percentuais de resíduo influenciam nas condições de extrusão da massa cerâmica;
- Analisar como os diferentes percentuais de resíduo influenciam na perda de massa durante o processo de queima do corpo cerâmico;
- Verificar a influência dos diferentes percentuais de substituição da argila pelo RBRO nas propriedades de absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, retração linear e limite de resistência à compressão da cerâmica vermelha, para as diferentes temperaturas de queima;
- Comparar os resultados obtidos através dos ensaios realizados com corpos de prova cilíndricos cerâmicos com a norma ABNT NBR 15270-1: 2017.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 MATERIAIS CERÂMICOS

São vários os pontos de vista sobre os quais é possível estabelecer uma definição para a expressão “materiais cerâmicos”. Cientistas, historiadores, engenheiros e setor produtivo abordam e definem o tema, cada um, por um viés diferente. A Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2016b) define o tema como sendo todos os materiais não metálicos, inorgânicos, normalmente obtidos após tratamento térmico (queima) fazendo uso de elevadas temperaturas.

Souza Santos (1989) corrobora essa definição e acrescenta que os materiais cerâmicos são, em sua maioria, materiais isolantes térmicos e elétricos, de elevada dureza, alta fragilidade, resistentes a esforços de compressão e a temperaturas elevadas, apresentando também boa resistência em ambientes quimicamente agressivos.

Ainda de acordo com Souza Santos (1989), a existência de defeitos no material serve como fator de concentração de tensão, ou seja, pontos onde a magnitude de uma tensão aplicada é amplificada. A amplificação de tensão associada com qualquer defeito existente é muito menor para tensão de compressão que de tração, por essa razão, as cerâmicas são materiais frágeis, que exibem resistências muito maiores à compressão que a resistência à tração.

Os materiais cerâmicos são formados pela união de elementos metálicos (Al, Na, K, Mg, Ca, Si, etc) e elementos não-metálicos (O, S, N, C e P) através de ligações iônicas e/ou covalentes e são constituídos, basicamente, por óxidos, nitretos e carbetos. A maior parte das fases cerâmicas formadas é cristalina, entretanto, materiais cerâmicos com estrutura amorfa também são encontrados, como é o caso dos vidros.

Devido à grande diversidade de matérias-primas ofertadas na natureza, produtos cerâmicos tradicionais com as mais variadas características podem ser produzidos, produtos permeáveis (velas de filtros), produtos impermeáveis (louças sanitárias),

produtos rústicos (telhas e tijolos), produtos de acabamento fino (porcelanas), produtos frágeis ao fogo e elementos refratários.

Os materiais cerâmicos podem, tecnologicamente, ser divididos em dois grupos: os cerâmicos tradicionais e os avançados. No grupo dos materiais avançados estão as fibras ópticas, capacitores, cerâmicas piezelétricas, biomateriais (próteses), produtos de alta resistência (abrasivos e ferramentas de corte), de alta temperatura (refratários para indústria cimentícia e metalúrgica), entre outros. Os materiais cerâmicos tradicionais compreendem o grupo de materiais que tem aplicação típica na construção civil, como, telhas, tijolos, grés, louças sanitárias e azulejos, além de porcelana elétrica, material frequentemente utilizado na indústria elétrica, e utensílios de mesa e adornos. Esse grupo de materiais cerâmicos, os tradicionais, é, por vezes, subdividido em cerâmica vermelha, cerâmica branca e vidros (CARTER; NORTON, 2007).

### **3.1.1 Cerâmica vermelha**

A expressão cerâmica vermelha é usada de forma ampla para fazer referência a diversos materiais frequentemente utilizados na construção civil, como, blocos, telhas, tijolos, tubos, dentre outros, além de objetos não pertencentes à categoria de materiais de construção (ABCERAM, 2016b).

Três elementos básicos fazem parte da composição desses materiais, argila, sílica e feldspato. Os minerais à base de silicatos são materiais abundantes devido à grande quantidade de silício e de oxigênio existentes na crosta terrestre e à alta resistência da ligação Si-O (CARTER; NORTON, 2007).

Segundo Jordão; Zandonadi (2002) a nomenclatura “vermelha” é utilizada devido à presença de compostos ferrosos que desenvolvem coloração avermelhada após a queima e a tonalidade varia de acordo com a quantidade de óxido de ferro, além da presença de outros minerais e matéria orgânica no processamento térmico.

Porém, de acordo com Souza Santos (1989), a expressão “vermelha” não faz, necessariamente, alusão a produtos que apresentem essa coloração.

### 3.1.2 Massas utilizadas na produção de cerâmica vermelha

Massa cerâmica pode ser entendida como a composição de materiais que deve cumprir alguns requisitos, como, equilíbrio entre materiais plásticos e não plásticos e adequada composição química e mineralógica de modo que as transformações físico-químicas que acontecem durante o processo de queima possam assegurar as características desejadas ao produto acabado (RIBEIRO; FERREIRA; LABRINCHA, 2003).

As massas cerâmicas utilizadas na produção cerâmica são classificadas em simples ou compostas. A massa simples é considerada aquela formada apenas por argila, podendo conter mais de uma argila ou materiais argilo-arenosos. Já as massas compostas são aquelas constituídas por matérias-primas diversas, como, por exemplo, argila e resíduo (MOTTA *et al.*, 2002).

Ainda de acordo com Motta *et al.* (2002), os elementos que compõem a massa cerâmica vermelha são agrupados em plásticos e não plásticos. Os plásticos apresentam importantes características no processo de conformação das peças cerâmicas, como moldagem e resistência mecânica a verde. Os elementos não plásticos atuam na etapa de conformação e na etapa de secagem, exercendo a função de diminuidor da retração das peças e ajudando no processo de secagem, podendo se apresentar como inertes, vitrificantes e fundentes na fase de queima.

A grande diversidade de argilas encontradas na superfície da Terra permite a fabricação de produtos cerâmicos com características bem diversas. As massas a serem utilizadas devem ser escolhidas de acordo com: o produto que se quer obter; o método a ser utilizado para conformá-lo; o tipo de queima; e as características do produto final. As massas mais comumente inseridas nos processos produtivos no Brasil se dividem em dois grupos: massas para baixas temperaturas, com temperaturas de queima até 1100°C e massas para altas temperaturas, com temperaturas superiores a esse valor (GIARDULO, 2005).

As argilas apresentam larga variabilidade em termos de composição química, mineralógica e física. Em geral, a argila pura, composta basicamente por minerais

argilosos, não apresenta condições ideais de processamento, por esse motivo, as massas cerâmicas industriais para cerâmica vermelha são formuladas usando dois ou mais tipos de argilas, objetivando promover condições favoráveis de conformação e das propriedades finais (MACEDO *et al.*, 2008).

### **3.1.3 Argila para a indústria de cerâmica vermelha**

A argila, matéria-prima principal utilizada na fabricação de produtos cerâmicos, proporciona o uso de técnicas simples de processamento do material, além de adquirir plasticidade ao ser misturada com água e resistência mecânica após passar pelo processo de sinterização. Argilas sedimentares recentes de margens de rio, várzeas ou lagos que contém óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, além de matéria orgânica, são, geralmente, utilizadas na indústria cerâmica. Em geral, as argilas não são puras, mesmo que contenham um argilomineral predominante (SOUZA SANTOS, 1989).

Ainda de acordo com Souza Santos (1989), argila é definida como material terroso, de granulometria fina, com alto teor de partículas de diâmetro específico equivalente inferior a 2 $\mu$ m, constituída, essencialmente, por argilominerais, contendo também minerais acessórios, como, por exemplo, quartzo, feldspato, mica, hematita, dolomita, dentre outros, além de matéria orgânica e impurezas. Quimicamente as argilas são formadas, essencialmente, por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio.

Argilas empregadas na fabricação de componentes cerâmicos são constituídas essencialmente de argilominerais como a illita e a caulinita. A presença de illita adequa o material ao processo de fabricação da cerâmica vermelha enquanto a caulinita está diretamente associada com as propriedades físico-mecânicas dos produtos obtidos a partir desse material.

A caulinita, a montmorilonita e a illita se destacam como os mais importantes argilominerais existentes na natureza. As diferenças entre esses argilominerais estão basicamente no tipo de estrutura e nas substituições que podem ocorrer. Argilas com maior teor do argilomineral caulinita são mais refratárias, pois são

constituídas essencialmente de sílica e alumina. Quando a presença dos argilominerais illita e montmorilonita aumenta, a refratariedade do material diminui devido à presença de potássio, ferro e outros elementos (SANTOS *et al.*, 2012; RIBEIRO; FERREIRA; LABRINCHA, 2003).

Santos *et al.* (2012) afirmam que a presença dos argilominerais citados anteriormente contribui para maior perda de massa e maior retração de queima, conferindo ao material menor estabilidade de queima. Já o quartzo, outro tipo de mineral presente nas argilas, é responsável pela resistência mecânica e diminuição da retração.

A fase líquida, no processo de sinterização, aparece em temperaturas mais baixas e de forma mais acentuada, nas argilas ilíticas, quando comparadas com as argilas caulínicas. A explicação é embasada na elevada quantidade de óxidos fundentes, em torno de 5%, enquanto que na caulinita não chegam a 2% (PINHEIRO; HOLANDA, 2010).

Quartzo, hematita, feldspatos, calcário, dentre outros minerais acessórios das argilas, agem alterando certas propriedades do material tais como retração de queima, cor, dilatação, resistência mecânica e plasticidade. As argilas desenvolvem plasticidade quando misturadas com água, e, no processo de queima, perdem essa plasticidade e adquirem resistência mecânica (MONTEIRO, 2007).

Ribeiro, Ferreira e Labrincha (2003) relatam que há relação da plasticidade das argilas com: o tamanho e forma das partículas; a umidade do material; a composição mineralógica; dentre outros fatores. Afirmam que quanto menor o tamanho das partículas, maior a superfície específica e maior tende a ser a plasticidade do material.

De acordo com Souza Santos (1989) a granulometria das argilas está entre as principais propriedades da massa cerâmica para a produção de blocos cerâmicos.

A classificação das argilas para a fabricação de cada produto cerâmico específico pode estar relacionada a uma granulometria adequada, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Composição granulométrica para produção de cerâmica vermelha

Tipo de produto	Composição granulométrica (%)		
	<2( $\mu\text{m}$ )	2 a 20( $\mu\text{m}$ )	>20( $\mu\text{m}$ )
Telhas, capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	25 a 55

Fonte: Elaborado pela autora adaptado de Pracidelli; Melchiades (1997).

Para Pracidelli e Melchiades (1997), a composição granulométrica é propriedade importante para formulação da massa cerâmica vermelha. Eles relatam que argilas de granulometria muito fina apresentam alta resistência mecânica e plasticidade, mas alertam para a necessidade de maior quantidade de água de mistura.

Motta *et al.* (2002) classificaram as argilas, dividindo-as em dois grupos: um grupo considerando a cor de queima (argilas de queima avermelhada), utilizadas como matéria-prima para cerâmica vermelha, placas cerâmica de revestimento, agregado leve, além de peças utilitárias e de decoração, com coloração avermelhada; e outro grupo considerando a mineralogia (argilas cauliníticas de queima clara), utilizadas como matéria-prima para cerâmica sanitária, placas cerâmica via úmida e porcelana.

De acordo com Menezes *et al.* (2001), as argilas usualmente empregadas em cerâmica vermelha são quaternárias recentes de elevada plasticidade, adequadas ao processo de conformação por extrusão. Essas argilas plásticas proporcionam à massa cerâmica, resistência mecânica adequada para manuseio do material no intervalo entre a conformação e a queima. Quando queimadas em temperaturas em torno de 900°C adquirem propriedades que tornam as peças de cerâmica vermelha capazes de desempenharem seu papel no que se refere às características físicas como, por exemplo, absorção de água, porosidade e resistência mecânica.

Os elementos não plásticos atuam na etapa de conformação e na etapa de secagem, exercendo a função de diminuidor da retração das peças e ajudando no processo de secagem, podendo se apresentar como inertes, vitrificantes e fundentes na fase de queima. Os componentes fundentes desempenham importante papel, atuando na formação de fase líquida durante a queima, de modo suficiente para adquirir resistência mecânica adequada (MOTTA *et al.*, 2002).

Os fundentes são constituintes da massa cerâmica e devem ser dosados proporcionalmente nessas massas, de modo que atendam às características do produto desejado. Uma aplicação demasiada de fundentes pode provocar alguns problemas, tais como falta de estabilidade dimensional e deformação nas peças obtidas, apesar das vantagens que aparentemente proporcionam em relação à diminuição da porosidade e conseqüentemente aumento na resistência mecânica e redução na absorção de água nos produtos cerâmicos (MACÊDO *et al.*, 2011).

No Quadro 1 são apresentadas as principais propriedades de componentes constituintes das argilas.

Quadro 1- Principais propriedades dos componentes constituintes das argilas

Componentes	Propriedades principais
Alumina	Propicia estabilidade dimensional em temperaturas elevadas
Sílica livre	Diminui a retração durante o processo de queima e reduz a plasticidade
Silicatos e fosfatos	Agem como fundentes e podem provocar aumento da resistência mecânica
Matéria orgânica	Provoca retração e fissuras durante o processo de queima, além de modificar a coloração
Carbonato e sulfato de cálcio e magnésio	Proporcionam expansão volumétrica e agem como fundentes
Sais solúveis	Propiciam o aparecimento de eflorescências

Fonte: Elaborado pela autora adaptado de Kazmierczak (2007)

### 3.1.4 Produção de cerâmica vermelha

A cerâmica vermelha está inserida no setor dos minerais não metálicos da indústria de transformação mineral e faz parte do complexo produtivo da construção civil, tendo como produtos principais os blocos, tijolos, telhas, elementos vazados, lajes,

lajotas, ladrilhos vermelhos, tubos e agregados leves. Também fazem parte da cerâmica vermelha, argilas expandidas, objetos ornamentais e utensílios domésticos (ABCERAM, 2016 c).

A maior parte da cerâmica vermelha no Brasil é produzida por empresas de pequeno e médio porte, nas quais se identifica mão de obra com qualificação inadequada e deficiência de mecanização e gestão. As empresas encontram-se distribuídas por todo o país e estão localizadas nas regiões onde há maior disponibilidade de matéria-prima e proximidade dos mercados consumidores. A indústria de cerâmica vermelha é bastante relevante na área de materiais cerâmicos, sendo responsável por 4,8% da indústria da construção civil e 90% das alvenarias e coberturas construídas no Brasil. Esse mercado representa cerca de 1% do valor bruto da produção industrial e a região sudeste é a que mais se destaca no setor, respondendo por 44,38% de toda produção nacional. Estima-se a existência de quase 7000 empresas trabalhando no ramo da cerâmica vermelha em todo o Brasil (ANICER, 2018; BRASIL, 2017; SEBRAE, 2015).

Há, porém, uma deficiência em dados estatísticos e índices de desempenho no setor, o que dificulta a obtenção de um panorama mais amplo e atual dessa importante área industrial (ABCERAM, 2016 d).

De acordo com Matos (2010) esse ramo da indústria brasileira apresenta grande número de processos e produtos que são obtidos, essencialmente, pelo beneficiamento da argila, pela conformação e pelo tratamento térmico.

A produção na indústria da cerâmica vermelha abrange a fase do processamento e beneficiamento da matéria prima (coleta, sazonalidade, estoque, dosagem, moagem e mistura), produção (extrusão, corte e prensa) e processo de queima e inspeção. O sazonalidade da argila, etapa na qual o material é estocado a céu aberto, tem o objetivo de aumentar a plasticidade da argila, eliminar os sais solúveis e promover a decomposição da matéria orgânica existente. A dosagem deve ser seguida com rigor e estar vinculada à técnica que será empregada para dar forma às peças. Já a moagem tem a finalidade de diminuir os grãos para aumentar a superfície específica,

ampliando a área de contato e proporcionando melhor empacotamento (ABCERAM, 2016 a; MONTEIRO, 2007).

Corroborando com os autores acima, Correia, Hotza e Segadães (2005) relatam que os componentes plásticos da massa cerâmica vermelha são os argilominerais e que os componentes não plásticos são feldspatos (fundentes) e quartzo (inertes). Afirmam que cada um desses componentes pode desenvolver e influenciar o material durante todas as etapas de produção; porém, os componentes plásticos atuam de forma incisiva na fase da conformação, enquanto os componentes não plásticos (fundentes e inertes) contribuem de forma intensa no processamento térmico.

Proporcionar plasticidade adequada, imprimindo à massa cerâmica condições ideais de conformação, é o papel do componente plástico que compõe a massa. A plasticidade do material deve ser tal que ele possa ser moldado, apresentando-se de forma rígida para manuseio, não podendo destorroar antes ou após a queima. Entende-se por plasticidade a propriedade que possui o corpo cerâmico úmido de mudar de forma de modo irreversível ao ser submetido a uma dada tensão. Plasticidade deficiente na massa cerâmica provoca pouca resistência a verde enquanto o excesso causa trincas por retração de secagem (MENEZES *et al.*, 2001).

Ribeiro, Ferreira e Labrincha (2003); Menezes *et al.* (2008); Santos *et al.* (2012) avaliam os aspectos fundamentais sobre a extrusão da massa cerâmica vermelha e os índices de plasticidade. Eles afirmam que a composição e a preparação da massa cerâmica, bem como a plasticidade, o molde e o tipo de extrusora utilizados afetam o rendimento do processo e a qualidade do produto final.

Porém, é na queima ou sinterização que se identifica uma das etapas mais importantes do processo de produção da cerâmica vermelha. Essa etapa é responsável por transformar um material friável num produto resistente, através da ação do calor, no qual as partículas se unem umas as outras em nível atômico. A temperatura de queima varia de acordo com o teor de argilominerais presentes no corpo cerâmico, além de outras variáveis. Durante o processo de sinterização ocorrem transformações químicas e físicas no material. A perda de massa é

associada às transformações químicas, a densificação e vitrificação são associadas às transformações físicas. Essas reações que ocorrem no material promovem a formação de novas fases cerâmicas que são importantes para as propriedades físico-mecânicas do produto final. Uma fase importante nesse processo é a de formação da mulita, responsável pelo ganho de resistência mecânica do material. A temperatura de queima é um parâmetro importante na indústria cerâmica vermelha também no que se refere a implicações econômicas, energéticas e ambientais (PINHEIRO; HOLANDA, 2010).

Ainda segundo Pinheiro e Holanda (2010) é na etapa da sinterização que a densificação do material acontece, porém, é comum a permanência de poros após a finalização desse processo, interferindo negativamente em algumas propriedades do material como resistência mecânica e elasticidade, além da interferência em outras propriedades.

Algumas propriedades do material cerâmico estão relacionadas à porosidade. Enquanto a absorção de água do material aumenta com o aumento da porosidade, a condutividade térmica e elétrica, a massa específica aparente e o módulo de elasticidade diminuem. Portanto o aumento da porosidade, e conseqüentemente, a potencialização das falhas, torna o material mais frágil, diminuindo sua resistência mecânica (SOUZA; PINHEIRO; HOLANDA, 2010).

Corroborando com os autores acima, Segadães, Carvalho e Achar (2005), afirmam que o comportamento dos minerais argilosos e suas funções dentro da massa cerâmica podem ser observados a partir da sua composição química, frequentemente apresentada na forma de óxidos, tais como: sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), dentre outros. Relatam ainda que no processo de sinterização, a partir da combinação da alumina com a sílica, é formada a mulita, composto cristalino em formato de agulhas, responsável pelo aumento da resistência mecânica da peça.

O ciclo de queima interfere de forma muito significativa na qualidade do produto final, além disso, ocorrem transformações de natureza irreversível na matéria-prima nessa etapa do processamento. A composição das matérias-primas e o ciclo de queima

(tempo e temperatura de queima) são os principais fatores envolvidos no processo de produção de cerâmica vermelha (HOLANDA e SALEIRO, 2012).

## 3.2 ROCHAS ORNAMENTAIS

### 3.2.1 Conceito, evolução do uso e processo produtivo

As rochas são constituídas por minerais cristalinos que se agrupam naturalmente de acordo com seu tempo geológico. Entre seus principais minerais formadores estão os silicatos, os carbonatos, os óxidos, os sulfetos e os sulfatos. É um dos materiais mais utilizados ao longo da história da humanidade, oferecendo resistência, beleza e harmonizando ambientes. Foram inicialmente utilizadas com objetivo de suportar cargas em compressão e tiveram sua utilização ampliada, fascinando construtores e escultores com sua beleza e imponência, dando destaque para as denominadas rochas ornamentais. (SIEGISMUND; SNETHLAGE, 2014).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da norma NBR 15012:2013 define rochas ornamentais como material rochoso natural submetido a diversas formas de beneficiamento com a finalidade estética de revestir superfícies, especialmente paredes, pisos e fachadas.

Esse material rochoso pode ser extraído em placas ou blocos, que são serrados em formas variadas, passando em seguida por um processo de beneficiamento no qual é polido e lustrado. Utilizado para fabricação de adornos, pés e tampos de mesa, esculturas, revestimento de paredes, de pisos e de pilares, dentre outros usos, é um material cuja aplicação vem crescendo ao longo dos anos.

As rochas ornamentais e de revestimento mais comercializadas são granitos e mármore. Os granitos são rochas de composição silicática e os mármore, em sua maioria, são de composição carbonática. As rochas silicáticas apresentam composição mineralógica definida por associações variadas de quartzo, feldspato, micas (biotita e muscovita), anfibólios, olivina e piroxênios, nas quais nem todos os constituintes aparecem necessariamente, porém os quatro primeiros são minerais dominantes em rochas graníticas. As rochas carbonáticas são em sua maioria de

origem biodentrítica, formada em ambientes marinhos devido à deposição de conchas e esqueletos de organismos que são preservados como fósseis muito ou pouco fragmentados, dependendo do grau de metamorfização da rocha. Comercialmente, o termo mármore é empregado para designar todas as rochas carbonáticas, metamórficas ou não (SARDOU FILHO *et al.*, 2013).

Em todas as fases da história das civilizações a utilização das rochas vem se fazendo presente e aos poucos se tornando responsável pela caracterização das cidades, contribuindo com o crescimento socioeconômico e cultural dos povos, além é claro, de auxiliar na evolução da arquitetura. Considerados como materiais nobres, as rochas ornamentais ganharam espaço no início do século XX e a introdução de processos de mecanização para extração e beneficiamento dessas rochas acompanharam esse processo, ampliando as formas de uso das rochas ornamentais e conseqüentemente seu consumo. O crescimento e desenvolvimento do setor continuaram e melhorias nos métodos de extração, beneficiamento, uso e aplicação acompanharam o processo (TEIXEIRA; MELO; OLIVEIRA, 2012).

### **3.2.2 Evolução da indústria**

Com o crescimento do setor, a indústria de rochas ornamentais evoluiu de uma produção mundial de aproximadamente 1,8 milhões de toneladas/ano na década de 1920 para 140,0 milhões de toneladas em 2015 e previsão de produção de mais de 400 milhões de toneladas para 2025 (ABIROCHAS, 2018; BEZERRA, 2017; BRASIL, 2009).

O Brasil se posiciona em quinto lugar no *ranking* mundial de exportação, sendo a China a campeã, seguida por Itália, Índia e Turquia. As reservas recuperáveis são da ordem de seis bilhões de metros cúbicos de rochas ornamentais no Brasil, não havendo, porém estatística consolidada sobre as reservas mundiais (BRASIL, 2018; BRASIL, 2015).

Com mais de 1200 variedades de rochas ornamentais, catalogadas em 2016, o Brasil atua nos mercados interno e externo com 1700 pedreiras em funcionamento e

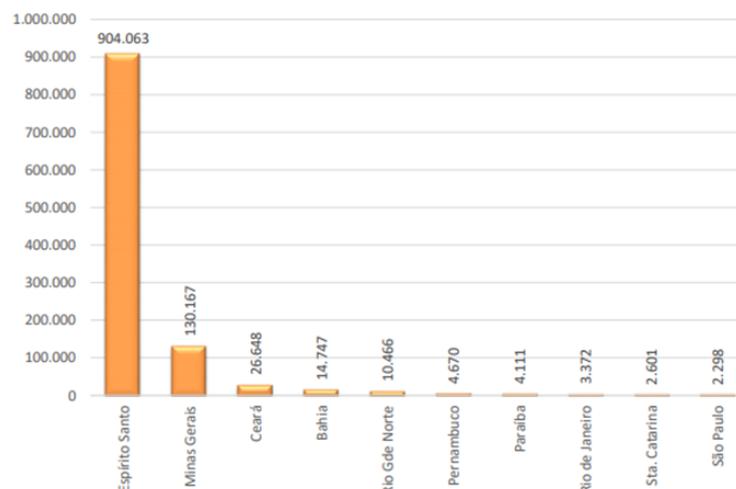
10.000 empresas atuando na cadeia produtiva (PRODUTORES DE ROCHAS ORNAMENTAIS. VITÓRIA STONE FAIR, 2016).

A maior variedade de rochas ornamentais no mundo é encontrada no Brasil, que manteve, em 2017, relações comerciais com 117 países, sendo os principais mercados consumidores, Estados Unidos, China e Itália. A preferência dos maiores consumidores é por granitos, seguida por mármore, ardósias e quartzitos. Do faturamento das rochas comercializadas pelo Brasil 87,02% correspondem ao comércio dos granitos e similares, em torno de 6% mármore e similares, ficando o restante para o comércio das demais rochas (ABIROCHAS, 2018).

O território do estado do Espírito Santo, devido à excepcional diversidade geológica, evidencia ampla vantagem competitiva em termos de jazimentos de rochas ornamentais, especialmente granitos (SARDOU FILHO *et al.*, 2013).

No ano de 2017, o Brasil assumiu a terceira colocação mundial no que se refere à exportação de granito e o estado do Espírito Santo respondeu por mais de 70% das exportações brasileiras que contou com a participação de 16 estados da federação. O parque industrial do Estado é composto por mais de mil empresas e conta com cerca de 1200 teares dos 1500 instalados no Brasil. A Figura 1 apresenta o desempenho dos dez maiores estados brasileiros exportadores de rochas ornamentais (ABIROCHAS, 2018; SMITH, LAUREN - CENTRORROCHAS, 2018).

Figura 1 - Principais estados brasileiros exportadores em 2017 (US\$ 1.000)



Fonte: Abirochas (2018)

As jazidas de granito, mostradas nas Figuras 2 e 3 correspondem ao amplo conjunto de rochas silicáticas pertencentes ao Estado do Espírito Santo.

Figura 2 - Jazida de granito



Fonte: Sindirochas (2013)

Figura 3 - Jazida de granito - Nova Venécia / ES



Fonte: Sardou Filho (2013)

### 3.2.3 Geração de resíduos no beneficiamento de rochas ornamentais

Para serem utilizadas na construção civil as rochas ornamentais são extraídas em blocos que precisam ser desdobrados para obtenção de chapas brutas. As chapas passam por processo de polimento, etapa que agrega importante valor comercial ao produto (MANHÃES; HOLANDA, 2008).

A extração e o beneficiamento dessas rochas compreendem as etapas principais da produção do setor. Ocorre, no entanto, que na fase do beneficiamento uma enorme quantidade de resíduos é gerada, são toneladas de resíduos descartadas, anualmente, que podem impactar, negativamente, o meio ambiente e provocar danos à saúde das pessoas. Por não ter uma aplicação prática definida, esses resíduos, como mostrado na Figura 4, são, em grande parte, descartados em lagoas, rios, córregos, lagos e no próprio solo (ALMEIDA; BRANCO; SANTOS, 2007).

Figura 4 - Lagoas de sedimentação de resíduos



Fonte: Reis (2008)

Para Santos, Destefani e Holanda (2013), o desdobramento, etapa que faz parte do beneficiamento, é definido como o processo de transformação dos blocos de rocha, extraídos dos maciços rochosos, em chapas e é realizado através da serragem em equipamentos denominados de teares. Essa serragem pode ser feita através da utilização de teares com fio diamantado ou utilizando teares convencionais de lâminas de aço em conjunto com polpa abrasiva.

A Figura 5 representa o uso de tear convencional fazendo uso da polpa abrasiva na serragem de um bloco de granito durante o processo de beneficiamento. O tear convencional de lâminas de aço é o processo mais utilizado para beneficiamento desses blocos. A polpa abrasiva é utilizada com o objetivo de lubrificar e resfriar as lâminas de serragem, servir como abrasivo para facilitar a serragem, além de outras finalidades.

Figura 5 - Polpa abrasiva no processo de serragem do bloco de granito



Fonte: Reis (2008)

Destefani (2009) e Moreira, Freire e Holanda (2003) afirmam que o beneficiamento das rochas ornamentais gera enorme quantidade de resíduo na forma de lama e que a polpa abrasiva utilizada no processo é constituída por água, usada para refrigerar as máquinas, pó de pedra, cal e granalha.

Menezes, Neves e Ferreira (2002) relatam que a lama do beneficiamento causa danos ao meio ambiente, afirmando que essa lama, enquanto fluida, afoga plantas e animais, contamina os corpos hídricos, deprecia o solo e provoca assoreamento de rios; quando seca, fica em forma de pó, sendo prejudicial à saúde e ao meio ambiente. Alertam ainda que o resíduo, na forma de lama, além de poluir rios, córregos e lagos, afeta esteticamente a paisagem e demanda de grandes áreas para a sua estocagem.

Ainda de acordo com Menezes, Neves e Ferreira (2002) a quantidade de resíduos gerada aumenta à medida que a produção do setor aumenta e pode chegar a 50% em massa do volume produzido.

Já de acordo com Moura e Leite (2011), no desdobramento dos blocos extraídos, cerca de 20% a 30% do bloco é transformado em pó, presentes na lama do beneficiamento.

Estimativa da geração de resíduo no processo de beneficiamento de rochas ornamentais feita por alguns pesquisadores é apresentada na Tabela 2.

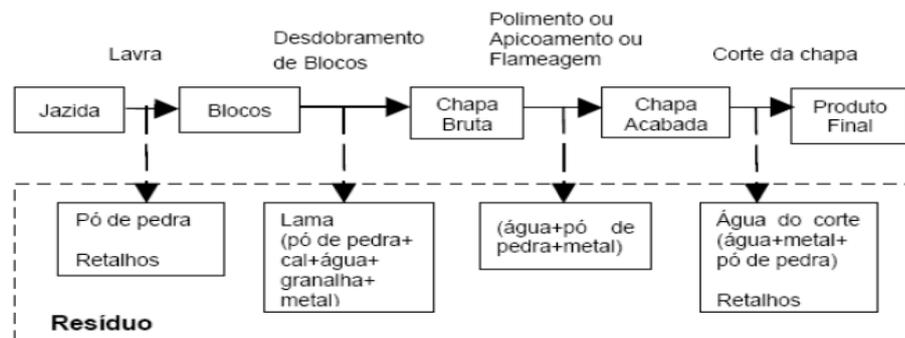
Tabela 2 - Percentual de resíduo gerado no beneficiamento de rochas ornamentais

Autores	Estimativa de resíduo gerado (% em volume em relação ao bloco)
Gonçalves (2000); Cavalcanti (2006) e Vilaschi e Sabadini (2000)	25% a 30%
Silva (1998); Vieira (2004) e Reis e Alvarez (2007)	30%
Gobbo <i>et al.</i> (2004) e Mello <i>et al.</i> (2006)	30% a 40%

Fonte: Elaborado pela autora adaptado de Destefani (2009)

A Figura 6 representa o processo no qual é gerado o resíduo proveniente do corte e beneficiamento de rochas ornamentais. É importante destacar que o resíduo utilizado nessa pesquisa é o resíduo proveniente da lama obtida a partir do desdobramento dos blocos de rochas ornamentais.

Figura 6 - Esquema do processo de geração de resíduos nas indústrias de rochas ornamentais



Fonte: Reis (2008)

Almeida, Branco e Santos (2007) observaram que, em algumas empresas, após finalizado o processo de desdobramento nos teares, a lama é direcionada para um filtro-prensa, drenada por um sistema de esgotamento e levada para tanques de decantação, onde a água é reaproveitada e o material sólido retirado é depositado nos pátios da empresa.

Pensando em uma solução para gestão dos resíduos gerados no beneficiamento das rochas ornamentais foram criados Centros de Tratamento de Resíduos (CTR), empresas que recebem os resíduos gerados por diversas indústrias do setor. Os resíduos, em forma de lama, chegam ao local em caminhões e são direcionados para um filtro-prensa com o objetivo de reduzir a quantidade de água. Em seguida, os resíduos são retirados desse filtro e depositados em uma área destinada a aterro.

Na Figura 7 são apresentadas imagens do silo e do filtro prensa do primeiro CTR do Estado do Espírito Santo, instalado em Nova Venécia, noroeste capixaba, enquanto na Figura 8 estão destacadas imagens do local onde são depositados os resíduos após o processo de filtragem e retirada da água.

Figura 7 - Centro de Tratamento de Resíduos de Nova Venécia – ES



(a) Silo

(b) Filtro prensa

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 8 - Centro de Tratamento de Resíduos de Nova Venécia – ES/ Aterro



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

### 3.2.3.1 Composição química do resíduo de rochas ornamentais

As empresas do setor de rochas ornamentais trabalham com variados tipos de rochas de acordo com a demanda do mercado consumidor, por essa razão, os resíduos do beneficiamento dessas rochas possuem composições químicas variadas. Na Tabela 3 é observada a variabilidade da composição química dos resíduos dessas rochas de acordo com alguns autores.

Tabela 3 - Composição química do resíduo de rochas ornamentais

Composição	Manhães <i>et al.</i> (2008)	Mota (2012)	Santos <i>et al.</i> (2010)	Souza <i>et al.</i> (2010)	Uliana <i>et al.</i> (2013) Amostra 1*	Uliana <i>et al.</i> (2013) Amostra 2*
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,04	11,76	8,74	3,70	7,57	3,79
SiO <sub>2</sub>	72,17	49,47	14,60	66,43	63,75	66,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,80	14,39	5,85	17,23	14,55	13,50
CaO	2,33	8,79	40,67	2,23	3,72	3,44
MgO	0,94	2,21	1,59	0,32	0,31	0,93
TiO <sub>2</sub>	1,072	1,14	1,43	0,83	0,22	0,16
não	2,34	1,99	0,87	1,01	3,58	3,50
K <sub>2</sub> O	3,87	6,28	1,89	7,49	5,01	3,83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,27	NA	NA	NA	0,07	0,07
SO <sub>3</sub>	NA	NA	NA	NA	0,06	0,06

Nota: NA- Não apresentado

Fonte: Elaborado pela autora adaptado de Souza, Pinheiro e Holanda (2010) e Uliana *et al.* (2013)

\*O estudo de Uliana *et al.* (2013) amostra 1, avalia resíduo proveniente de tear convencional com uso de polpa abrasiva enquanto o estudo com amostra 2 faz análise de resíduo proveniente do beneficiamento em tear com fio diamantado.

### 3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS

#### 3.3.1 Visão geral

O crescimento populacional e o conseqüente desenvolvimento industrial nem sempre estão alinhados com um desenvolvimento sustentável, provocando, dentre outras agressões ao meio ambiente, geração de resíduos, que pode prejudicar o meio, tanto pelo volume produzido quanto por sua composição, que muitas vezes contém substâncias tóxicas e perigosas, dificultando uma disposição final adequada. Por representar uma real ameaça ao meio ambiente, a geração e destinação dos resíduos vêm ganhando atenção no mundo inteiro. Nesse contexto, em 2010, foi sancionada, no Brasil, a lei 12305, Brasil (2010) que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que estabelece responsabilidade compartilhada aos fabricantes, distribuidores e comerciantes e faz previsão da logística reversa como solução para a minimização da geração de resíduos. A aplicação dessa lei tem como objetivo final o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, que segue algumas diretrizes importantes. A não geração de resíduos ou, na impossibilidade dessa não geração, a redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final são etapas sequenciais compreendidas na ordem de prioridade da gestão dos resíduos tratadas nessa lei. Sendo assim, é relevante que os resíduos sólidos possam ser inseridos em processos produtivos, deixando o *status* de inservíveis para serem enxergados como matérias-primas.

Veiga (2010) complementa que a reutilização de materiais pode ser uma alternativa viável, tanto para diminuir o volume de resíduos descartado no meio ambiente, quanto para prolongar a vida útil das reservas de matérias-primas naturais.

#### 3.3.2 Definição e classificação

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

“Resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta 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 inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções tecnicamente e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

A referida NBR faz uma classificação ambiental dos resíduos em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, seja qual for a sua origem, de acordo com a periculosidade, conforme mostrado no Quadro 2. Algumas características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade são fatores que conferem periculosidade ao resíduo. Para a classificação do resíduo em inerte e não inerte é feita uma avaliação de acordo com a solubilidade dos constituintes em água. Estão compreendidos na classe IIB os resíduos que não provocam alteração dos padrões de potabilidade da água, com exceção de alteração de cor, turbidez, dureza e sabor.

Quadro 2 - Classificação dos resíduos quanto à periculosidade

Classificação dos resíduos quanto à periculosidade		
Classe I	Classe II	
Perigosos	Não perigosos	
Podem acarretar riscos a saúde pública ou meio ambiente	A - Não inerte	B – Inerte

Fonte: Elaborado pela autora adaptado de ABNT NBR 10.004:2004.

A ABNT NBR 10.004:2004 faz classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública para que possam ser gerenciados adequadamente.

### 3.3.3 Classificação do resíduo de rochas ornamentais

Manhães e Holanda (2008), Santos (2010) e Uliana *et al* (2013) relatam que o resíduo de rochas ornamentais é classificado como Resíduo de Classe IIA – Não Inerte, podendo ser utilizado como um subproduto da construção civil.

Souza, Pinheiro, Holanda (2010) confirmam essa classificação submetendo os resíduos de rochas ornamentais aos ensaios de lixiviação e solubilização e o classificam, de acordo com a ABNT NBR 10.004:2004, como material não inerte e classe IIA, justificando a importância da utilização do resíduo como matéria prima pela não contaminação das fontes de água e de todo meio ambiente, quando descartados de forma inadequada, além de outras razões.

### **3.3.4 Incorporação de resíduos sólidos em massas cerâmicas**

De acordo com Veiga (2010) a busca por um modelo de desenvolvimento sustentável resulta na adoção de condutas como a minimização do consumo de matérias-primas virgens e sua substituição por matéria-prima reciclada.

Essa substituição de matérias-primas virgens por matérias-primas recicladas, na produção de materiais cerâmicos, é atrativa por motivos variados, dentre os quais se destacam o fato de a indústria da construção civil consumir enorme volume de insumos obtidos a partir de matérias-primas naturais e o processo produtivo não sofrer alterações significativas com a inserção do resíduo, além do fato de os produtos cerâmicos para a construção civil possuírem larga variabilidade em sua composição química e mineralógica.

Zhang (2013) faz uma revisão dos diversos resíduos utilizados na fabricação de blocos, enquanto Menezes, Neves e Ferreira (2002) elaboram uma visão geral da utilização de diferentes resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas e afirmam que os resíduos sólidos podem ser, numa abordagem prática, agrupados em: redutores de plasticidade, fundentes, cinzas volantes, combustíveis e resíduos da incineração de rejeitos urbanos e radioativos de acordo com suas características e influências sobre as propriedades das formulações cerâmicas.

Menezes, Neves e Ferreira (2002) ainda afirmam que a massa utilizada na indústria cerâmica possui componentes plásticos e componentes não plásticos, permitindo que se faça o uso de resíduos em sua composição até mesmo em porcentagens significantes.

A inserção de resíduo da construção civil e demolição (RCD) para a produção de tijolos cerâmicos é abordada por Gaspareto e Teixeira (2017). Eles apontam que, ao contrário da massa cerâmica constituída por argila pura, quanto maior a temperatura de queima, menor é a resistência mecânica à compressão com a massa cerâmica com adição de RCD. Observam também que a resistência mecânica e a massa específica aparente diminuem com a inserção do RCD e que a porosidade aparente e a absorção de água aumentam.

Casagrande *et al.* (2008) estudaram variados resíduos industriais e a inserção desses resíduos em matrizes cerâmicas diversas. Eles relatam que o processo para incorporação do resíduo é compatível com as plantas cerâmicas atuais, o que facilita o processo produtivo, sem interferência no *layout* existente na indústria.

Segundo Pinheiro *et al.*(2008) o uso em cerâmica vermelha de resíduo proveniente da produção de papel acarretou aumento da porosidade da estrutura cerâmica argilosa. Constatou-se que com adição de 10% em peso do material reciclado a absorção de água da cerâmica aumentou em 24,4%, indicando, porém, viabilidade técnica para uso em torno de 3% do referido resíduo.

Três tipos de resíduos provenientes das etapas de desarenação, decantação e filtração de uma estação de tratamento de água foram inseridos em cerâmica argilosa. Os resíduos do filtro e do decantador apresentaram constituição mineralógica similar à das argilas com predomínio de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , enquanto o resíduo do desarenador revelou-se basicamente de quartzo com traços de mica e de caulinita, atuando como desplastificante, reduzindo a absorção de água e a retração linear da cerâmica queimada e mostrando maior potencial para ser incorporado na massa cerâmica. A maior restrição apresentada foi referente à resistência mecânica, em relação à qual os autores alertam para a necessidade de obediência à norma específica para cada produto final desejado (VITORINO; MONTEIRO; VIEIRA, 2009).

A fabricação de pavimentos cerâmicos e cerâmica celular a partir da reutilização de resíduos sólidos oriundos do polimento de revestimentos (porcelanato) gerados por uma indústria cerâmica da região sul de Santa Catarina, foi estudada por Dagostim

(2008). Resíduos provenientes do polimento e resíduos de outros processos da indústria, denominados de resíduos convencionais, foram investigados. Enquanto o resíduo convencional apresentou características fortemente fundentes, atingindo retração média de 10,77%, boa densificação e baixa absorção de água, o resíduo de polimento apresentou expansão em torno de 27,4%, baixa densidade, absorção de água bastante elevada, consequência da grande quantidade de poros fechados e abertos, revelando-se uma cerâmica fortemente expandida, ou seja, uma cerâmica celular.

### **3.3.5 Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais incorporado em matrizes cerâmicas**

De acordo com Menezes, Neves e Ferreira (2002) e Segadães, Carvalho e Achar (2005) o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais deve ser amplamente pesquisado devido ao grande impacto ambiental que provoca quando descartado na natureza de forma indiscriminada e devido ao potencial que possui como matéria-prima. A preocupação crescente com esse tipo de resíduo baseia-se também nos elevados índices de crescimento do setor de rochas ornamentais e conseqüentemente no aumento da geração do resíduo.

Esse resíduo é material não plástico que apresenta grande quantidade de quartzo, feldspatos e mica. No processo de produção dos materiais cerâmicos com adição desse resíduo, os minerais, acima citados, atuam como desplastificantes e fundentes, diminuindo a quantidade de água necessária para conformação e facilitando a secagem. Na queima o quartzo atua como inerte, podendo ainda apresentar uma parte dissolvida na fase líquida formada. Já os feldspatos e mica favorecem a formação de fase líquida e contribuem para a diminuição da porosidade das peças. Além de apresentar comportamento não plástico, agindo como redutor de plasticidade quando adicionado às massas argilosas, o resíduo de rochas ornamentais, no que se refere a aluminatos e silicatos, possui composição química similar à composição dessas massas (SEGADÃES; CARVALHO; ACCHAR, 2005; PEDROTI *et al.*, 2012).

É importante destacar que o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais pode atuar como agente formador de fase vítrea, preenchendo poros do material ou servindo como matriz vítrea ligante de grãos cristalinos, o que sugere como resultado, material com baixa absorção de água, indicado para comporem a matriz de produção de revestimentos, tijolos, grés, dentre outros (MENEZES, NEVES E FERREIRA, 2002; RAIGÓN, GARCIA E SÁNCHEZ, 1996; VIEIRA, 1999).

Com a finalidade de inserir o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em processos produtivos foi que Calmon *et al.* (1997) iniciaram pesquisas fazendo uso desse resíduo na produção de argamassas. Desde então, estudos com matrizes cerâmicas (20%), cimentícias (72,5%) e betuminosas (7,5%) vêm sendo realizados visando à reutilização desse resíduo na fabricação de materiais para a construção civil. O objetivo é incorporar o RBRO na fabricação de produtos sem que esses percam suas características e propriedades essenciais, proporcionando diminuição do consumo de matéria-prima natural e não renovável e redução do volume de RBRO descartado inadequadamente na natureza. Os estudos que abordam o uso desse resíduo em diferentes materiais, como telhas, tijolos, revestimentos de piso e parede, asfalto, blocos, concretos e argamassas vêm sendo feitos por diversos pesquisadores da comunidade acadêmica (CALMON *et al.*, 1997; FREIRE E MOTTA, 1995; GOTTARDI, 2015; HAMZA *et al.*, 2011; MONTEIRO; PEÇANHA; VIEIRA, 2004; NEVES, PATRICIO E FERREIRA, 2000; SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016; SEGADÃES; CARVALHO; ACCHAR, 2005; VIEIRA, 1999).

Foi em matriz cerâmica que Monteiro, Peçanha e Vieira (2004) trabalharam com a adição de 20; 30 e 40%, em massa, de resíduo de granito, e obtiveram redução da plasticidade e da retração linear de secagem quando compararam com corpo cerâmico constituído de argilas e areia de uma formulação industrial para fabricação de telhas cerâmicas. Os resultados foram melhores para o teor de 40% do resíduo tanto para absorção de água quanto para resistência à flexão, destacando melhores resultados de absorção para temperaturas variando de 850°C até 1000°C e de resistência para todas as temperaturas estudadas.

Souza, Pinheiro e Holanda (2013) inseriram 10; 20; 30; 40 e 47,5%, em massa, de resíduo de rocha, em formulação típica para fabricação de ladrilhos cerâmicos,

substituindo o feldspato da formulação, e verificaram diminuição da absorção de água e aumento da retração e da resistência com o aumento do teor de resíduo. Eles vincularam a importância do estudo à tendência de escassez do feldspato e à possibilidade de uso do resíduo como alternativa viável, técnica e economicamente, para solucionar a demanda do setor.

A inserção de resíduo de granito como subproduto para a fabricação de revestimentos de piso e parede foi estudada por Hojamberdiev, Eminov e Xu (2011). Os autores observaram que as propriedades físico-mecânicas do material testado para piso obtiveram, com adição de 30% de resíduo, melhores resultados que o mesmo material testado para parede com adição de 20% do mesmo resíduo. A explicação para tal resultado é embasada nas temperaturas utilizadas, pois, temperaturas menores de queima não podem acelerar a completa fusão do resíduo.

Dhanapandian e Gnanavel (2009) investigaram o efeito da incorporação de resíduo de mármore e de granito na produção de bloco cerâmico e constataram que é possível substituir até 50% do material argiloso pelo referido resíduo, sem alterar de forma significativa, as propriedades mecânicas do material. Constataram também que com teor de resíduo de 20% o material apresenta os melhores resultados e que é possível economia de energia no processo de sinterização com a inserção do resíduo.

A avaliação de propriedades físicas e mecânicas, utilizando corpos cerâmicos obtidos a partir da incorporação de resíduo de rochas ornamentais, foi feita por Acchar, Vieira e Segadães (2006). Eles utilizaram 70% de argila e 30% de resíduo, em duas composições, granito e, mármore e granito, e observaram que a composição somente com resíduo de granito apresentou menor porosidade e maior retração de queima que a composição com os dois tipos de resíduo para todas as temperaturas avaliadas e que a resistência à flexão foi maior para a composição somente com resíduo de granito para temperaturas acima de 1000°C.

A análise do uso de resíduo de caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos foi feita por Menezes *et al.* (2008). Eles abordaram a dificuldade de empacotamento das partículas com a adição do caulim e atribuíram o

fato a características granulométricas do material adicionado. Afirmaram ainda que a imposição de elevadas taxas de cisalhamento durante a homogeneização da massa e confecção dos corpos de prova possibilita a diminuição das dificuldades de empacotamento oriundas dos aglomerados do resíduo do caulim, concluindo que o processo de extrusão é o mais indicado para a conformação do produto por proporcionar melhor densificação da massa.

Ainda de acordo com Menezes *et al.*(2008) a absorção de água do material cerâmico, após o processo de sinterização, aumentou na medida em que a quantidade de resíduos adicionados também aumentou, afirmando ser possível adição conjunta dos resíduos de caulim e de granito em até 20%. Eles constataram também que a resistência mecânica diminuiu com o aumento do teor de resíduos adicionado e fazendo uso de ferramentas estatísticas obtiveram valores estimados e medidos para as variáveis analisadas (absorção de água, retração linear e módulo de ruptura) concluindo que é viável a utilização dos resíduos. Eles destacaram que o modelo da equação de regressão adotada pode ser utilizado para se obter o teor ótimo de resíduo para produção de corpos cerâmicos com propriedades específicas.

Vieira *et al* (2004) incorporaram 10; 20; 30 e 40% de resíduo de granito em cerâmica vermelha e observaram melhora na plasticidade, no processo de extrusão e secagem, e, diminuição da retração de queima. Os autores afirmam que o material sinterizado tem sua porosidade e absorção de água diminuída e que a resistência mecânica praticamente não é alterada com adição do resíduo. Eles relatam que o volume e tamanho dos poros diminuem com a inserção do resíduo devido à fase líquida de sinterização, fase vítrea, resultante da maior presença de ( $K_2O + Na_2O$ ).

A resistência à flexão de corpos cerâmicos diminui com a inserção de resíduo de mármore e granito para temperaturas de sinterização até 1050°C; a partir dessa temperatura, a inserção dos resíduos provoca aumento na resistência. É possível trabalhar com incorporação de até 50% de resíduos com economia de energia quando comparado com as temperaturas utilizadas pelas indústrias do setor (ACCHAR; VIEIRA; HOTZA, 2006).

Para Souza, Pinheiro e Holanda (2010) a adição de resíduo de rochas ornamentais em massas cerâmicas para pisos vitrificados provoca maior densificação do material, reduzindo a absorção de água e aumentando a resistência mecânica. Porém, diferentemente dos trabalhos citados nos parágrafos anteriores, a retração linear de queima aumentou com a inserção dos resíduos, fato justificado pelo aumento do agente de fluxo  $K_2O$  que tende a acelerar o processo de sinterização.

A retração de queima também aumenta no estudo feito por Segadães, Carvalho e Acchar (2005) que fizeram uso de resíduos de mármore e granito com o objetivo de melhorar o processamento de produtos cerâmicos. Eles afirmam que as propriedades são modificadas em função do teor de resíduos e da temperatura de sinterização e que a cada temperatura de queima o resíduo atua como agente fluidificante, promovendo a formação e desenvolvimento de fase líquida, reduzindo a porosidade aberta e conseqüentemente a absorção de água.

O estudo sobre o uso de resíduo de mármore em massa cerâmica vermelha para blocos, feito por Saboya Jr, Xavier e Alexandre (2007) constatou que, mesmo com a melhoria de algumas propriedades com a inserção do resíduo, é preciso sempre avaliar as características desejadas para o produto final. O teor de incorporação de 15 a 20% do referido resíduo em massa cerâmica vermelha foi avaliado como uma boa proporção; entretanto, a absorção de água ficou acima da permitida para blocos cerâmicos.

Bories *et al.*(2014) abordaram o uso de agentes formadores de poros na matriz de blocos cerâmicos. O objetivo foi transformar os tradicionais blocos em produtos mais leves e com condutividade térmica reduzida através da criação de poros dentro de sua estrutura. Dentre os agentes formadores de poros estudados estavam os resíduos de mármore e granito que, de acordo com os referidos autores, além de contribuírem para a formação de um produto inovador, mais leve que os produtos tradicionais, também contribuíram na questão ambiental, proporcionando a redução de descarte desse resíduo no meio ambiente.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

As diversas etapas necessárias ao desenvolvimento dessa pesquisa, relacionadas às matérias-primas, ao procedimento para produção dos corpos cerâmicos e aos ensaios realizados, planejados com o objetivo de conhecer as características químicas, físicas, mecânicas, morfológicas e mineralógicas desses materiais, são apresentadas nesse tópico. Os experimentos e análises dos materiais foram realizados nos laboratórios de solos, concreto e betume, laboratório de materiais cerâmicos, laboratório de caracterização de materiais e laboratório mecânico de ensaios destrutivos do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), exceção feita à fluorescência de raios- X, ensaio que foi realizado na Universidade Federal de Campina Grande.

### **4.1 MATERIAIS UTILIZADOS**

As matérias-primas utilizadas para confecção dos corpos de prova (CP) são argilas, gentilmente cedidas pela empresa Cerâmica Adélio Lubiana Ltda., de Nova Venécia – ES, e resíduo proveniente da lama do beneficiamento de rochas ornamentais fornecido pelo CTR, também localizado em Nova Venécia - ES.

#### **4.1.1 Argilas**

Duas amostras de argila, uma mais clara e outra mais escura, foram selecionadas para realização do experimento. As amostras foram coletadas no pátio da empresa fornecedora do material, onde ficam estocadas a céu aberto. À argila mais clara, denominada pela empresa de argila forte, foi dada a nomenclatura de argila A, enquanto a argila mais escura, dita argila fraca, foi chamada de argila B. As imagens desses materiais estão apresentadas na Figura 9.

Figura 9 - Imagem das argilas no pátio da empresa fornecedora do material



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

#### 4.1.2 Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais

O resíduo, em forma de pó, apresentado na Figura 10, foi coletado no CTR, no local destinado ao aterro, após ter passado por filtro-prensa.

Figura 10 - Imagens do RBRO - local do aterro no CTR de Nova Venécia - ES



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

## 4.2 MÉTODOS

### **4.2.1 Planejamento dos experimentos**

O planejamento dos experimentos foi feito com o objetivo de definir as variáveis que provocam influências no material a ser ensaiado. As variáveis dependentes e independentes relacionadas a essa pesquisa são mencionadas a seguir. Como variáveis dependentes são analisadas:

- Plasticidade;
- Absorção de água;
- Porosidade aparente;
- Massa específica aparente;
- Retração linear de secagem;
- Retração linear de queima;
- Tensão de ruptura.

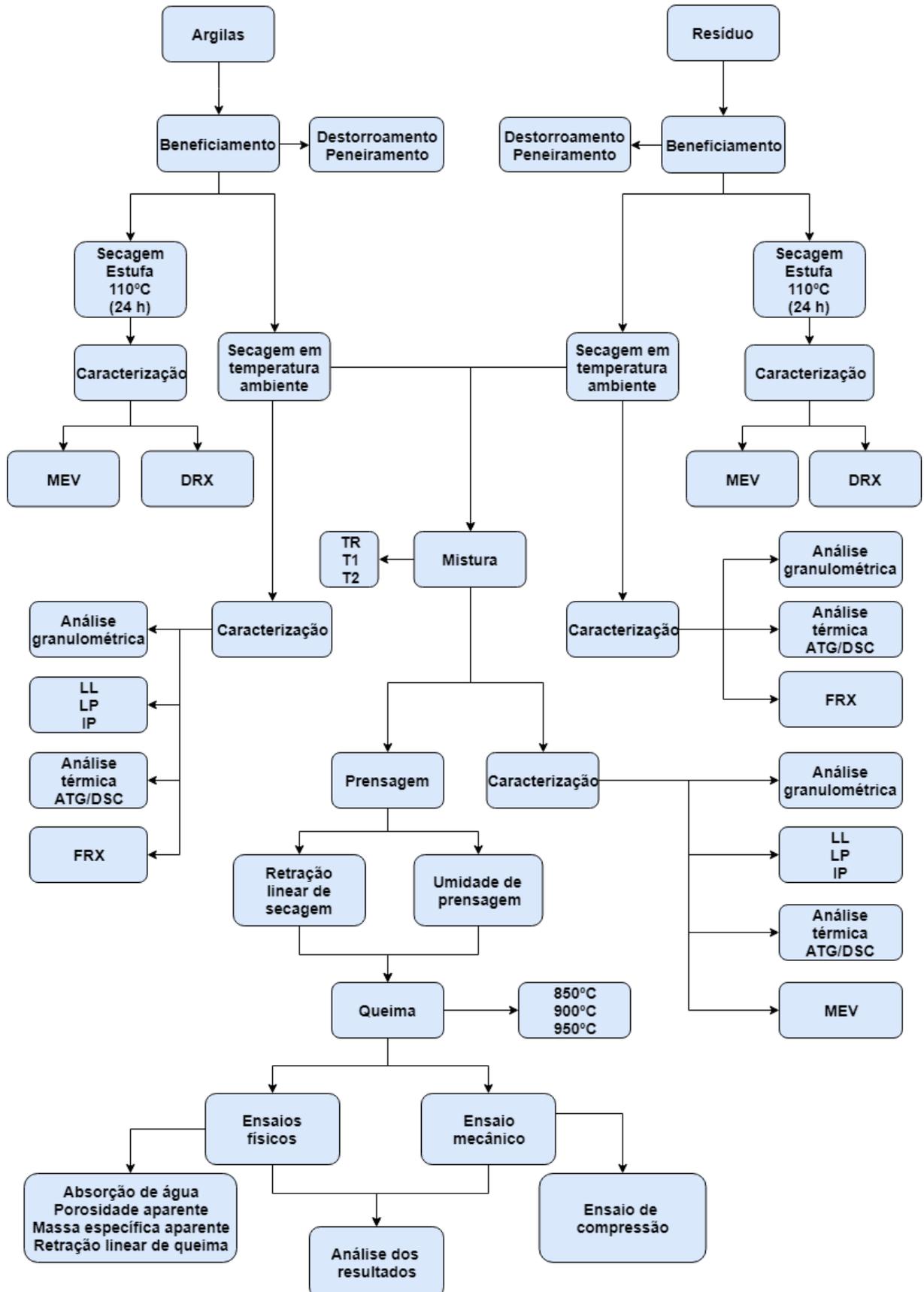
As variáveis independentes, aquelas introduzidas intencionalmente para verificar a relação de variações e a influência que produzem nas variáveis dependentes, são estabelecidas nesse trabalho, como:

- Teor de resíduo incorporado ao material;
- Temperaturas de sinterização (850; 900; 950)°C.

### **4.2.2 Programa experimental**

O programa experimental serviu de base para organizar todo o trabalho, definindo os materiais a serem utilizados e determinando quais ensaios deveriam ser executados para possibilitar análise da hipótese inicial: viabilidade de utilização do resíduo da lama do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial da argila menos plástica na produção de uma massa cerâmica para confecção de materiais cerâmicos. O programa experimental está representado através do fluxograma apresentado na Figura 11.

Figura 11- Fluxograma experimental para o desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

### 4.3 EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO

#### 4.3.1 Beneficiamento das matérias-primas

Parte das argilas e do RBRO foi separada para determinação dos limites de Atterberg, granulometria, fluorescência e análise térmica. Para tanto, as amostras foram secas somente em temperatura ambiente, de modo a possibilitar a conservação da matéria orgânica possivelmente existente no material. Após a secagem natural cada material foi destorroado em almofariz e passado na peneira ABNT nº 80 (abertura 0,177mm).

Outra quantidade das argilas A e B e do RBRO foi seca em estufa a 110 °C durante 24 h para eliminação da água livre, conforme apresentado na Figura 12. Após a secagem em estufa, cada material foi destorroado em almofariz e passado na peneira ABNT nº 80 (abertura 0,177mm) conforme mostrado na Figura 13.

Figura 12 - Argila A (prateleira superior), argila B (prateleira intermediária) e RBRO (prateleira inferior)



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 13 - Beneficiamento das argilas



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

#### 4.3.2 Determinação dos traços

Foram adotados três traços para serem analisados nessa pesquisa. O traço de referência TR é definido pela composição 3A-4B (três partes da argila A e quatro partes da argila B), o traço denominado T1 tem a composição 3A-3B-1R e o denominado T2 é formado por 3A-2B-2R. A Tabela 4 apresenta a composição dos traços com percentual em volume e na Figura 14 estão apresentadas as matérias-primas após destorroamento e peneiramento, prontas para homogeneização.

Tabela 4 - Composição dos traços (% em volume)

Matérias-primas	TR (%)	T1 (%)	T2 (%)
Argila A	43	43	43
Argila B	57	43	28,5
Resíduo	-	14	28,5

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 14 - Matérias-primas a serem homogeneizadas



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Foi adotado o traço TR: 3A-4B como referência por ser uma das composições adotada pela empresa fornecedora do material cerâmico. Os traços TR, T1 e T2 foram misturados e homogeneizados manualmente.

### **4.3.3 Caracterização das Matérias-Primas e dos traços estudados**

Os ensaios de análise de tamanho de partículas (distribuição granulométrica), plasticidade, difração de raios-X, análise termogravimétrica, fluorescência de raios-X e microscopia eletrônica de varredura foram realizados objetivando a caracterização física, mineralógica, química e morfológica das matérias-primas e dos traços TR, T1 e T2.

#### 4.3.3.1 Caracterização física

##### *4.3.3.1.1 Análise granulométrica*

As distribuições granulométricas das argilas A e B, do RBRO e dos três traços estudados foram realizadas por difração de laser (AG). O ensaio foi realizado no aparelho Malvern Mastersizer Hydro 2000 MU do Laboratório de Materiais Cerâmicos do IFES campus Vitória.

##### *4.3.3.1.2 Plasticidade*

As propriedades plásticas das argilas A e B e dos três traços TR, T1 e T2 foram determinadas através da análise dos limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP), de acordo com as normas regulamentadoras especificadas abaixo:

ABNT NBR 6459 -2016: Solo - determinação do limite de liquidez

ABNT NBR 7180- 2016: Solo - determinação do limite de plasticidade

O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado pela Equação (1).

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

Para a determinação do IP, os limites de Atterberg tomam como referência a umidade do material e baseiam-se na determinação dessa umidade em dois estágios distintos, nos quais o LL corresponde à umidade máxima necessária para que o solo esteja no estado plástico e umidade mínima para o estado líquido, ou seja, é o teor de água, expresso em porcentagem, de argila seca a 110°C por 24h, acima do qual, a massa fluirá como líquido. Já o LP corresponde ao teor de umidade da argila no instante que ela deixa de ser plástica tornando-se quebradiça. Essa umidade pode ser determinada através do teor de água, expresso em porcentagem, também de argila seca a 110°C por 24h, acima da qual a massa cerâmica pode ser moldada em rolos de 3 a 4 mm de diâmetro e aproximadamente 15 cm de comprimento (SANTOS *et al.*, 2012).

A Figura 15 mostra imagem do ensaio para determinação do LL com o uso do aparelho de Casagrande realizado no Laboratório de Solos do IFES campus Vitória.

Figura 15 - Ensaio para determinação do LL



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

#### 4.3.3.2 Análise mineralógica

A análise mineralógica qualitativa dos minerais presentes nas argilas A, B e RBRO foi realizada por difração de raios X (DRX). Os experimentos foram realizados em

um difratômetro Bruker, modelo D8 Advance no laboratório de caracterização do IFES campus Vitória.

#### 4.3.3.3 Análises térmicas (DSC/ATG)

As análises térmicas foram feitas nas argilas A e B, no RBRO e nos traços TR, T1 e T2, através do uso de um analisador simultâneo DSC/ATG. O ensaio foi realizado no equipamento BP Engenharia, modelo RB 3000, em atmosfera de nitrogênio, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min até 1050 °C no laboratório de caracterização do IFES campus Vitória.

#### 4.3.3.4 Análise química

A análise química das argilas A, B e RBRO foi feita utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X de energia dispersiva (EDX) acoplado a um computador para o processamento de dados, modelo EDX-720 da SHIMADZU, pertencente ao Laboratório de Caracterização da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais (UAEMa) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

#### 4.3.3.5 Análise morfológica

A textura dos materiais foi observada fazendo-se o uso da microscopia eletrônica de varredura (MEV) do pó cerâmico das argilas A e B, RBRO e dos três traços estudados. As amostras foram secas em estufa a 110°C por 24 h e encaminhadas para análise que foi realizada no laboratório de caracterização do IFES campus Vitória utilizando o aparelho EVO/MA 10 ZEISS.

### **4.3.4 Confeção dos corpos de prova**

Após homogeneização de cada traço estudado TR, T1 e T2, quantidade variável de água, em torno de 10% em peso, foi adicionada ao material, conforme apresentado na Figura 16. Os corpos de prova foram moldados em matriz cilíndrica por compressão uniaxial com ação única de pistão superior com carga de 2000 kgf, produzindo corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 12 mm de diâmetro e

aproximadamente 24 mm de altura, Figura 17. Para cada traço estudado e para cada temperatura de queima foram confeccionados 20 corpos de prova, totalizando 180 corpos, que foram devidamente identificados. Foi adotada forma cilíndrica, por analogia ao método de Souza Santos (1989), de modo a viabilizar o rompimento dos CPs por compressão, visto que um dos objetivos desse trabalho é analisar as massas cerâmicas para confecção de blocos, produto que é submetido, frequentemente, a esforços de compressão.

Figura 16 - Massa cerâmica umedecida e homogeneizada para confecção dos corpos de prova e moldes utilizados



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 17 - Prensa utilizada na moldagem dos CPs e CPs moldados e identificados



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

### 4.3.5 Sinterização dos corpos de prova

Os corpos de prova, devidamente identificados, tiveram seus comprimentos ( $L_0$ ) aferidos com paquímetro digital. Em seguida esses corpos foram secos em estufa a temperatura de 110°C por 24 h e medidos novamente ( $L_e$ ). Dando continuidade ao processo, os corpos de prova foram queimados em forno tipo mufla eletrônico, FORTELAB, tensão 220volts, do laboratório de ensaios mecânicos do IFES, campus Vitória, com taxa de aquecimento de 5°C/min com temperaturas de patamar de 850°C, 900°C e 950 °C, mantidos por 3 h na temperatura de referência e resfriados naturalmente desligando-se o forno. Essas temperaturas foram escolhidas por representar a faixa de temperaturas de queima utilizada pela indústria de cerâmica vermelha. Após a retirada do forno, os corpos cerâmicos sinterizados tiveram seus comprimentos e pesos aferidos, representados, respectivamente, por ( $L_s$ ) e ( $P_s$ ).

### 4.3.6 Caracterização física e mecânica dos corpos de prova

#### 4.3.6.1 Absorção de água (AA)

A capacidade de absorção de água que o corpo cerâmico possui está relacionada à quantidade de água que esse corpo absorve após ter passado pelo processo de sinterização e ser colocado em contato com água. Para avaliar esse ganho máximo percentual de massa que acontece com o corpo cerâmico foi utilizada metodologia baseada em Souza Santos (1989) e na ABNT NBR 15270-2: 2017 na qual os corpos de prova secos foram pesados em balança analítica, obtendo-se, assim, peso do corpo sinterizado seco ( $P_s$ ); posteriormente, os corpos foram imersos em água por um período de 24h, período no qual os poros abertos são preenchidos por água. Em seguida, os corpos cerâmicos foram retirados da água, o excesso de água foi removido e seus pesos foram, imediatamente, aferidos, obtendo-se o peso do corpo úmido ( $P_u$ ), representado na Figura 18. A absorção de água do corpo cerâmico é avaliada através do uso da Equação 2.

$$AA(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde AA é a absorção de água (%),  $P_s$  o peso do corpo sinterizado seco (g) e  $P_u$  o peso do corpo úmido (g).

Figura 18 - Pesagem dos corpos de prova úmidos



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

#### 4.3.6.2 Porosidade aparente (PA)

De acordo com Souza Santos (1989) a porosidade do corpo cerâmico, definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente no corpo cerâmico, é um índice que está associado às reações que se processam durante a sinterização, à composição mineralógica, à granulometria e ao grau de impurezas do material, e pode ser avaliada com o uso da Equação (3).

$$PA(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde PA é a porosidade aparente (%),  $P_s$  o peso do corpo sinterizado seco (g),  $P_u$  o peso do corpo úmido (g) e  $P_i$  o peso do corpo úmido imerso em água (g).

#### 4.3.6.3 Massa específica aparente (MEA)

A massa específica aparente é determinada pela relação entre o peso do corpo seco (em gramas) e o volume aparente desse corpo (em  $\text{cm}^3$ ), porém utilizando a

metodologia de Souza Santos (1989) é possível avaliar a MEA fazendo uso de variáveis já determinadas anteriormente e da Equação (4).

$$MEA \left( \frac{g}{cm^3} \right) = \frac{P_s}{P_u - P_i} \quad (4)$$

Onde MEA é a massa específica aparente ( $g/cm^3$ ),  $P_s$  o peso do corpo queimado seco (g),  $P_u$  o peso do corpo úmido (g) e  $P_i$  o peso do corpo imerso em água (g).

#### 4.3.6.4 Umidade (h)

Para determinação da umidade de prensagem os CPs foram pesados logo após sua moldagem, obtendo-se, assim, o peso úmido. Em seguida foram secos em estufa a 110°C por um período de 24 h e pesados em balança analítica, definindo o peso do corpo cerâmico não sinterizado seco. A umidade contida no material é, então, determinada pela Equação (5), a seguir:

$$h(\%) = \frac{P_{úmido} - P_{seco}}{P_{seco}} \times 100 \quad (5)$$

Onde h é o teor de umidade em porcentagem,  $P_{úmido}$  o peso do corpo logo após a moldagem e  $P_{seco}$  o peso do corpo seco em estufa.

#### 4.3.6.5 Retração linear após secagem (RLS)

A variação das dimensões lineares após a secagem em estufa a 110°C é consequência da eliminação de água da massa cerâmica. Ocorre que com a eliminação dessa água e a aproximação das partículas devido às forças de atração eletrostática surge o fenômeno da aglomeração e os vazios deixados pela água são parcialmente preenchidos provocando encolhimento do corpo de prova. Para calcular o valor da retração de secagem é utilizada a Equação (6). Um paquímetro digital foi utilizado como instrumento para fazer aferição dos comprimentos dos CPs.

$$RLS(\%) = \frac{L_o - L_e}{L_o} \times 100 \quad (6)$$

Onde RLS representa a retração de secagem (%),  $L_0$  o comprimento inicial do corpo de prova após conformação (mm) e  $L_e$  o comprimento do corpo de prova após secagem em estufa (mm).

#### 4.3.6.6 Retração linear após a queima (RLQ)

A retração linear após queima é o encolhimento provocado pela eliminação da água de constituição, matéria orgânica e  $\text{CO}_2$  da decomposição dos carbonatos após sinterização dos CPs e é calculada através da Equação (7).

$$RLQ(\%) = \frac{L_e - L_s}{L_e} \times 100 \quad (7)$$

Onde RLQ representa a retração linear de queima após o processo de sinterização (%),  $L_e$  comprimento do corpo de prova após secagem em estufa (mm) e  $L_s$  comprimento do corpo de prova após processo de sinterização (mm).

#### 4.3.6.7 Limite de resistência à compressão (LRC)

A avaliação da resistência à ruptura à compressão dos CPs foi realizada no laboratório de ensaios mecânicos destrutivos do IFES campus Vitória por meio da utilização de uma máquina universal de ensaios, marca EMIC, modelo DL10000, acoplada a um computador que registra a força submetida no momento da ruptura do corpo de prova e fornece o resultado do limite de resistência à compressão. Optou-se pela realização do ensaio de compressão porque o objetivo é o estudo da incorporação do RBRO para a fabricação de tijolos, elementos que estão sujeitos a tensões de compressão quando utilizados na construção civil.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na primeira abordagem desse tópico é feita apresentação e análise dos resultados para as matérias-primas, em forma de pó, na qual são realizadas análises físicas, mineralógicas, químicas e morfológicas. Na segunda abordagem são avaliadas características dos traços estudados, fazendo-se análise da plasticidade, granulometria, mineralogia e morfologia dos três traços e em seguida são feitas análises físicas e mecânicas dos corpos de prova moldados a partir das formulações dos traços TR, T1 e T2 e sinterizados nas temperaturas de 850°C, 900°C e 950°C.

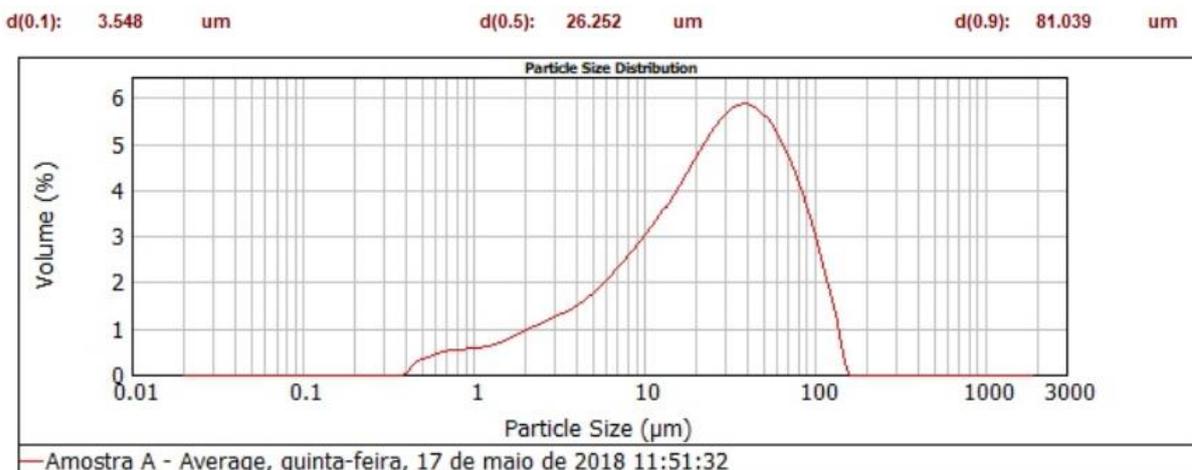
### 5.1 MATÉRIAS-PRIMAS

#### 5.1.1 Análise física

##### 5.1.1.1 Curva granulométrica

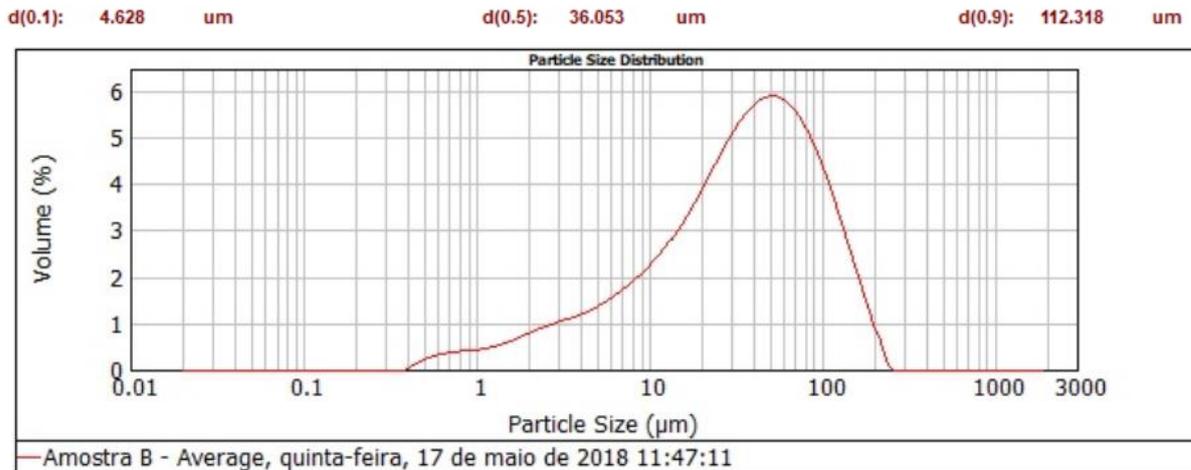
As curvas de distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas são apresentadas nas Figuras 19, 20 e 21.

Figura 19 - Curva granulométrica da argila A



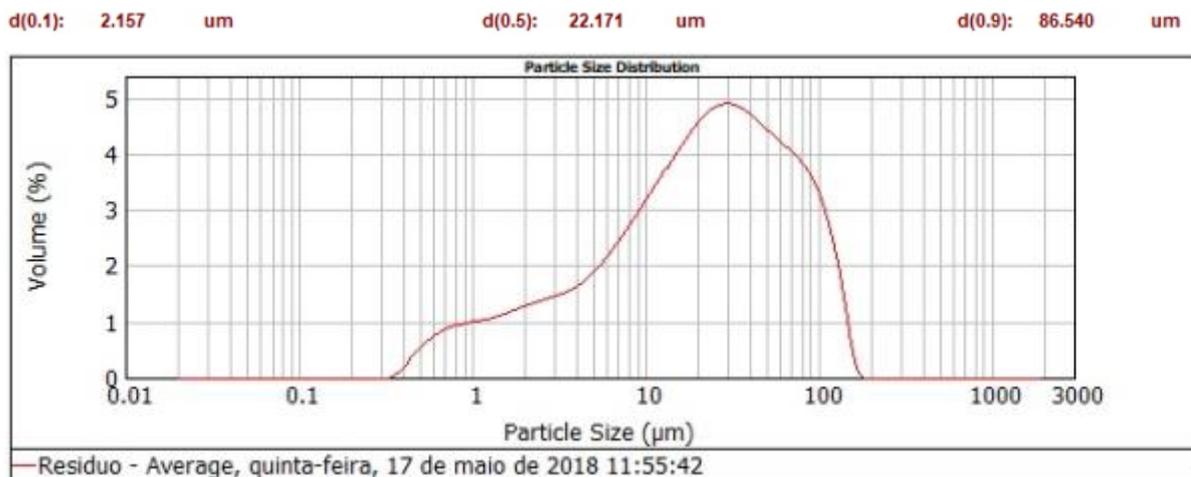
Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Figura 20 - Curva granulométrica da argila B



Fonte: Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Figura 21 - Curva granulométrica do RBRO



Fonte: Elaborado pela autora (2018)

A Tabela 5 apresenta os intervalos específicos para determinação das frações granulométricas de argila, silte e areia, de acordo com o proposto pela norma ABNT NBR 6502:1995.

Tabela 5 - Classificação granulométrica – Rochas e solos

Classificação granulométrica	Diâmetro dos grãos ( $\mu\text{m}$ )
Fração argila	<2
Silte	2 – 60
Areia fina	60 – 200
Areia média	200 – 600
Areia grossa	600 – 2000

Fonte: Elaborado pela autora adaptado de ABNT NBR 6502:1995

Analisando as curvas granulométricas em concordância com a norma ABNT NBR 6502:1995 sintetizada na Tabela 5, pode-se observar que:

- As argilas A e B apresentam percentual pequeno de partículas com granulometria abaixo de  $2\mu\text{m}$ , fração argila, sendo maior o percentual volumétrico desse material para a argila A, este fato pode estar relacionado ao maior teor do argilomineral, caulinita e indicativo de maior plasticidade para argila A;
- A fração que corresponde ao silte, (2 a 60)  $\mu\text{m}$  é predominante tanto na argila A quanto na argila B, definindo que as argilas são predominantemente siltosas;
- 90% das partículas da argila A possuem tamanho máximo de 81,039  $\mu\text{m}$  enquanto 90% das partículas da argila B possuem tamanho máximo de 112,318  $\mu\text{m}$ , mostrando que a argila A possui granulometria mais fina que a argila B;
- A argila B possui maior fração de material mais grosso (areia fina), além de apresentar uma fração de areia média, material não presente na argila A, indicando, possivelmente, menor plasticidade para a argila B;
- O RBRO possui um elevado teor de partículas finas e, sendo esse um material não plástico, inerte, as partículas finas, com porcentagem representativa, podem contribuir para redução da plasticidade na cerâmica e, conseqüentemente, redução do aparecimento de trincas.

### 5.1.1.2 Plasticidade

O índice de plasticidade das argilas é obtido a partir dos valores encontrados para os limites de Atterberg, LL e LP, e estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Plasticidade das argilas A e B

Plasticidade	Argilas	
	A	B
LL (%)	56	44
LP (%)	30	31
IP (%)	26	13

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Analisando os dados apresentados na Tabela 6 pode-se afirmar que a argila A é mais plástica que a argila B, resultado compatível com o sugerido na análise granulométrica.

De acordo com Santos *et al.* (2012) para que se tenha uma extrusão aceitável, a massa cerâmica deve apresentar índice de plasticidade entre 10 e 34% e limite de plasticidade entre 18 e 31%, enquanto que para uma extrusão ótima, esses valores devem estar entre 15 e 25% para o IP e 18 e 25% para LP.

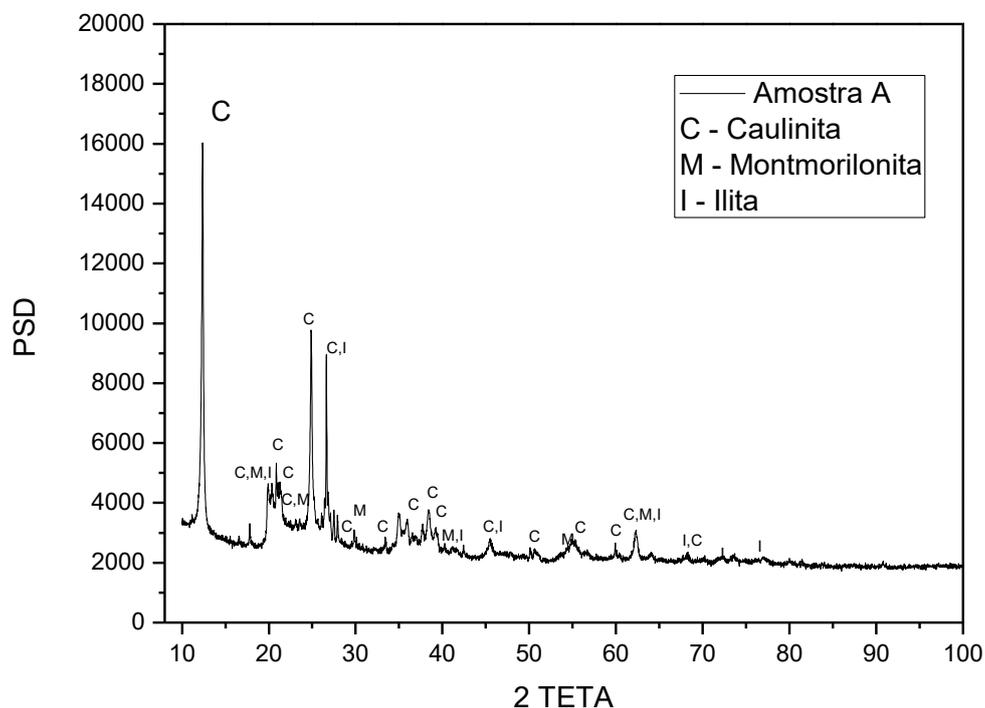
Com os resultados apresentados na Tabela 6 e as considerações de Santos *et al.* (2012) elencadas no parágrafo anterior é possível concluir que as argilas A e B se enquadrariam dentro do intervalo de aceitação para extrusão aceitável, caso fossem utilizadas individualmente, entretanto, como a argila A é muito plástica, a composição de 3A-4B é utilizada pela empresa fornecedora das argilas para obtenção de melhor processamento de tijolos cerâmicos.

### 5.1.2 Análise mineralógica

A presença de picos de difração correspondentes à caulinita, montmorilonita, ilita, muscovita, quartzo, microlina, albita e calcita das argilas e RBRO, é mostrada nos difratogramas de raios X que são apresentados nas Figuras 22, 23 e 24.

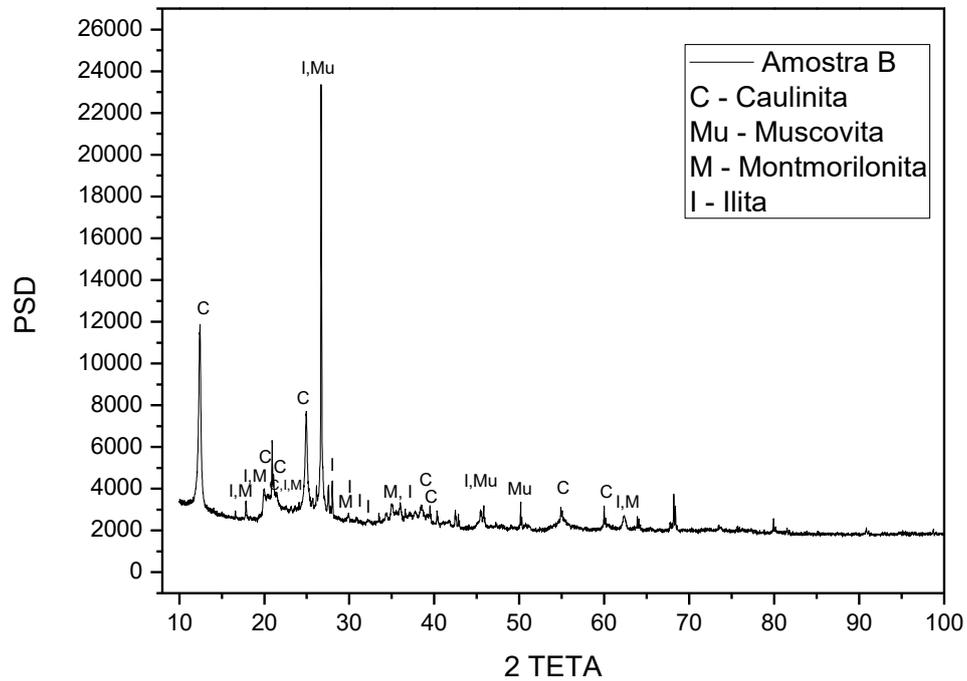
A caulinita, importante argilomineral presente no caulim e em muitas argilas utilizadas para a fabricação de produtos cerâmicos, é responsável pela plasticidade e resistência mecânica das peças conformadas, além de tornar o material mais refratário, característica atribuída pela constituição, essencialmente, de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Já a ilita adequa o material ao processo de fabricação da cerâmica vermelha, enquanto a montmorilonita, argilomineral altamente plástico, pode acarretar problemas no processamento, consequência da grande tendência de reidratação desse componente.

Figura 22 - Difratograma de raios X da argila A



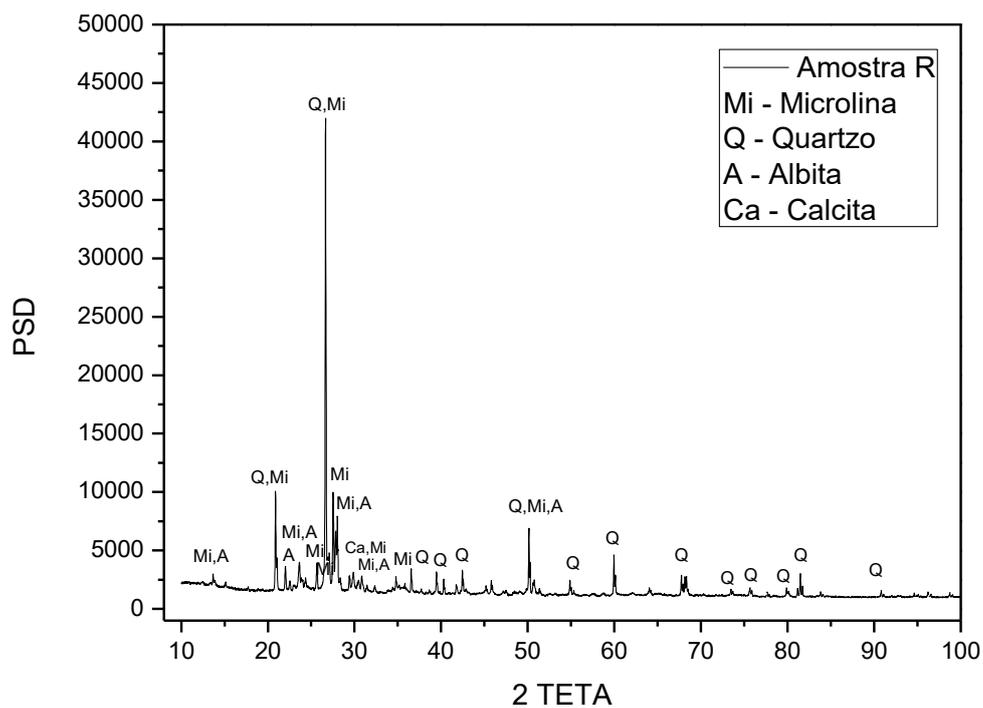
Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Figura 23 - Difratoograma de raios X da argila B



Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Figura 24 - Difratoograma de raios X do RBRO



Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Analisando as Figuras 22 e 23 é possível identificar a presença de picos comuns às duas argilas que constata a presença das fases cristalinas da caulinita, illita e montmorilonita. Além das fases citadas anteriormente, a argila B apresenta picos característicos da Mica Muscovita, mineral com morfologia lamelar que pode ocasionar o aparecimento de defeitos nas peças cerâmicas, e consequente redução da resistência mecânica, havendo, porém, a possibilidade de atuar como fundente devido à presença de óxidos alcalinos, desde que apresente partículas de tamanho reduzido.

Na Figura 24 podemos verificar a presença de picos identificando as fases cristalinas correspondentes ao quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), feldspato potássico ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  - microclina), albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e podemos concluir que o RBRO é proveniente, principalmente, de granitos, uma vez que há predominância de quartzo, mineral predominante nesse tipo de rocha. O quartzo atua como desplastificante, diminuindo a quantidade de água necessária para promover a conformação, facilitando a secagem e possível redução da retração de queima, etapa na qual o quartzo age como material inerte, servindo como um “esqueleto” envolvido pela fase líquida formada. A presença da microclina é benéfica para o processamento cerâmico, podendo se comportar como fundente, durante o estágio de queima, enquanto a albita, por ser um mineral refratário, pode dificultar as reações de sinterização acarretando em aumento da porosidade na cerâmica. A calcita está relacionada, principalmente, ao método mais frequente de beneficiamento das rochas, que faz uso de tear convencional, operando com granalha e óxido de cálcio como abrasivo e lubrificante, no processo de serragem das rochas (MONTEIRO; VIEIRA, 2003; MOREIRA; FREIRE; HOLANDA, 2003).

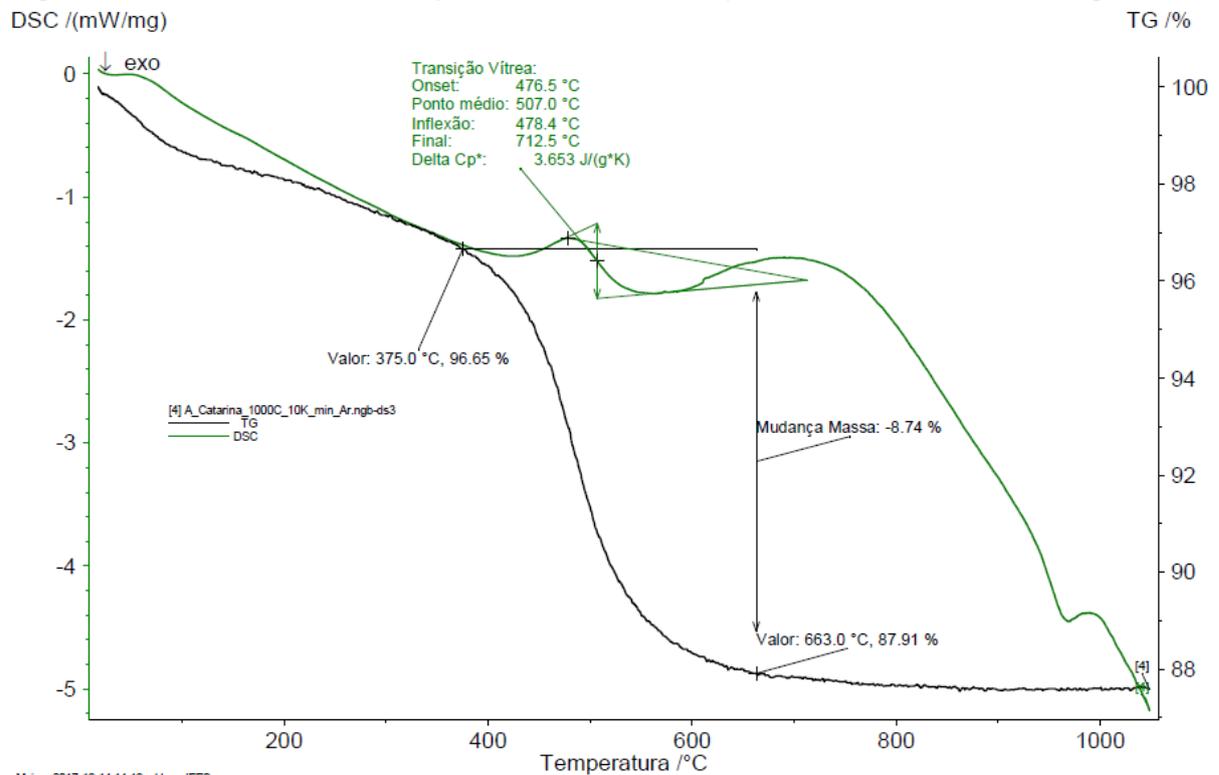
### **5.1.3 Análise térmica - Curvas DSC/ATG**

Transformações químicas e físicas que ocorrem na massa cerâmica podem ser diagnosticadas a partir de variações dimensionais (expansão e contração) das amostras que surgem em função das ações térmicas. Essas transformações térmicas no processamento cerâmico acontecem, basicamente, em função da evaporação da água livre e adsorvida, desidroxilação, oxidação, formação de fases

e sinterização da peça cerâmica (EMMERICH; STEUDEL, 2016; MONTEIRO; VIEIRA, 2003).

Nas Figuras 25, 26 e 27 é possível observar, respectivamente, as curvas DSC/ATG da argila A, argila B e resíduo e através dessas curvas, analisar as mudanças físicas e químicas que acontecem com cada uma das matérias-primas quando submetidas à variação de temperatura durante um período de tempo.

Figura 25 - Curvas DSC/ATG para análise do comportamento térmico da Argila A



Fonte: Elaborado pela autora (2018)

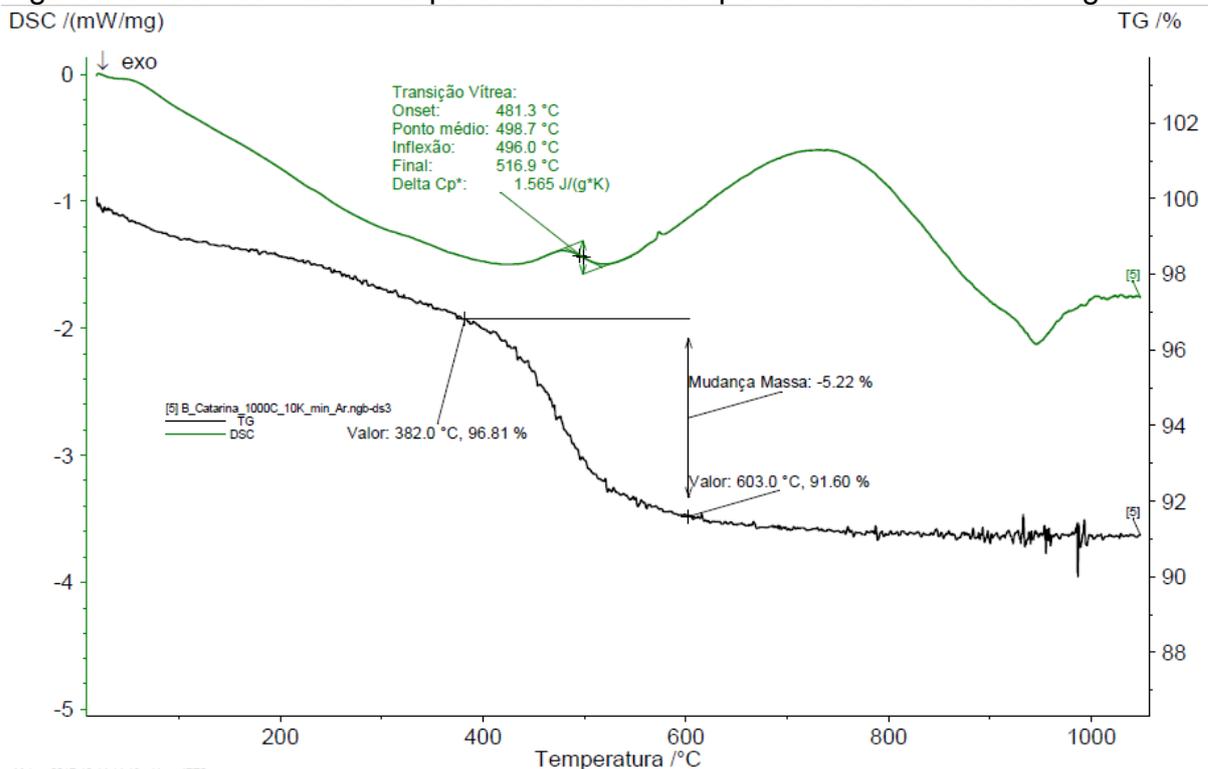
Ao analisar a Figura 25 é possível observar que em torno de 100°C acontece uma reação endotérmica, com perda de massa correspondente a água de umidade. À temperatura de 375,0°C ocorre uma reação exotérmica com perda de massa correspondente aos sulfetos e à combustão de matéria orgânica. A transição vítrea do material acontece na temperatura de 507°C e a perda de massa total dessa argila soma 12,09%. A maior perda de massa (8,74%) está representada por um pico endotérmico que acontece à temperatura de 663°C e está associada à destruição do reticulado cristalino dos argilominerais. A água do reticulado é aquela que faz parte da estrutura do cristal, como a encontrada entre as camadas dos cristais de caulinita

e a que resulta da remoção de hidroxilas dos argilominerais (rápida saída de água da caulinita, reação de desidroxilação, condição na qual é formada a metacaulinita) (SOUZA SANTOS, 1989; VIEIRA *et al.*, 2007).

De acordo com Vieira, Soares e Monteiro (2003), uma cerâmica é bem avaliada para o processamento industrial cerâmico se a perda de massa se situa entre 5 e 7%. Eles destacam ainda que elevada perda de massa é característica típica de argilas muito plásticas e constitui um dos principais fatores que conferem porosidade alta à cerâmica após o processo de queima.

Fazendo a análise da Figura 26 pode-se notar que a perda de massa total para a argila B é menor que para a argila A, o que era esperado uma vez que a plasticidade dessa argila também é menor. A maior perda de massa, 5,22%, ocorre entre as temperaturas de 382°C e 603°C, a transição vítrea acontece à temperatura de 498,7°C e a perda de massa total durante o processo é de 8,40%, não se enquadrando dentro do intervalo considerado por Vieira, Soares e Monteiro (2003), como uma argila bem avaliada para o processamento industrial.

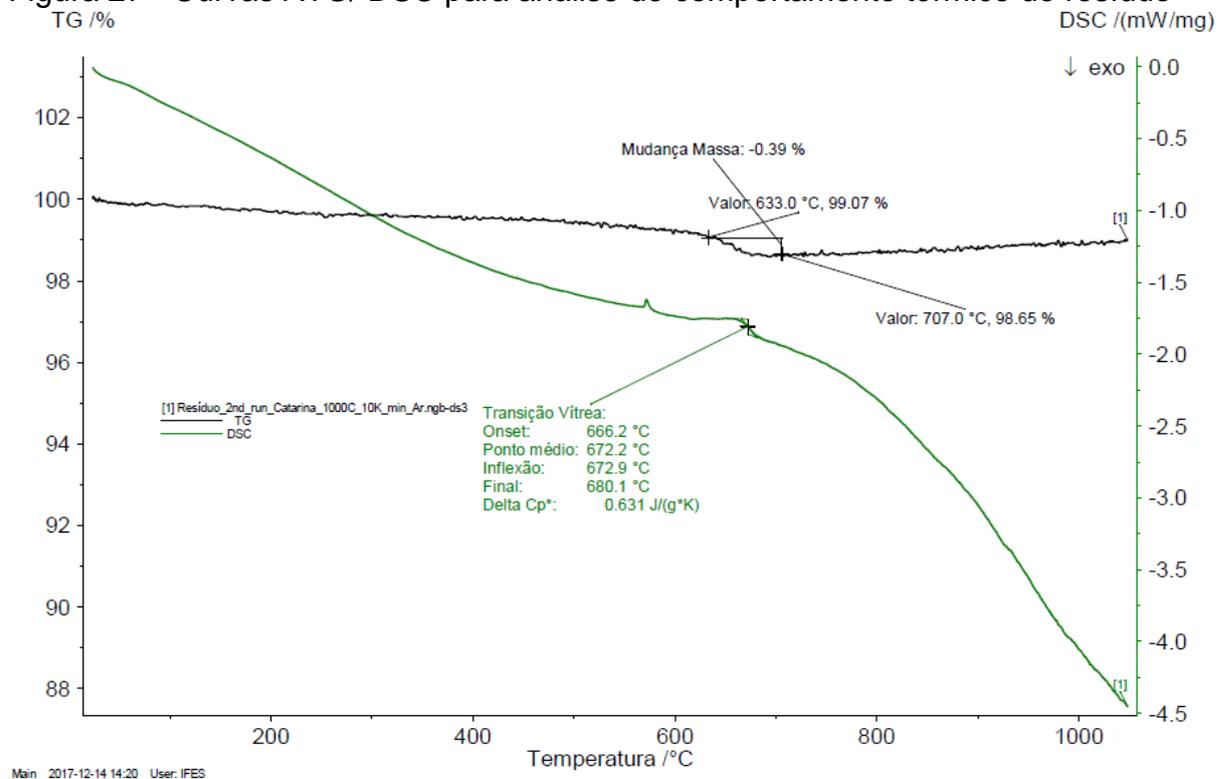
Figura 26 - Curvas DSC/ATG para análise do comportamento térmico da Argila B



Fonte: Elaborado pela autora (2018)

As curvas para análise do comportamento térmico do resíduo estão apresentadas na Figura 27 e é possível concluir através da análise dessa imagem que há uma pequena perda de massa (0,39%) em um pico endotérmico entre as temperaturas de 633°C e 707°C, que pode ser atribuída à eliminação de água de constituição de mineral micáceo. Esse pico endotérmico está associado à transformação alotrópica do quartzo. A transição vítrea ocorre à temperatura de 672,2°C, superior à temperatura de transição das argilas A e B (MENEZES *et al.*, 2008, VIEIRA; EMILIANO, 2013).

Figura 27 - Curvas ATG/ DSC para análise do comportamento térmico do resíduo



Fonte: Elaborado pela autora (2018)

#### 5.1.4 Análise química

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados obtidos da caracterização química através da fluorescência de raios-x das argilas A e B e do RBRO. Esses resultados indicam que as argilas A e B são compostas, principalmente, de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , totalizando 85,064% para a argila A e 98,652 (%) para a argila B.

Ainda observando a Tabela 7 é possível verificar que há predominância dos óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , típicos da composição de matéria-prima argilosa para cerâmica

vermelha. De acordo com Pinheiro e Holanda (2010), o alto percentual de  $Al_2O_3$  tende a aumentar a refratariedade das argilas.

Verifica-se que a argila A apresenta menor teor  $SiO_2$ , indicando maior plasticidade. É possível ainda observar que o composto alcalino  $K_2O$ , presente em maior quantidade na argila A, e alcalino-terrosos ( $CaO$  e  $MgO$ ), possuem efeito fundente, o que facilita a formação de fase líquida, necessária a consolidação das partículas, aumentando, conseqüentemente, a retração linear no processo de queima. O  $K_2O$ , geralmente apresentado na forma de feldspato, é importante no processo de densificação da cerâmica vermelha e de ganho de resistência mecânica no processo de sinterização (MANHÃES; MOREIRA; HOLANDA, 2009).

Tabela 7 - Resultados das análises químicas das matérias-primas em estudo

Composto	Composição química (%)		
	Argila A	Argila B	Resíduo
$SiO_2$	50,541	52,162	65,751
$Al_2O_3$	34,523	46,490	17,528
$Fe_2O_3$	8,860	0,585	4,620
$K_2O$	2,904	0,452	5,392
$CaO$	-	0,128	3,225
$Na_2O$	-	-	1,704
$MgO$	1,554	-	0,737
$BaO$	-	0,111	-
$TiO_2$	1,267	0,006	0,403
$P_2O_5$			0,320
$MnO$	0,107	-	0,063
$SO_3$	0,101	0,030	0,211
$ZrO_2$	0,096	0,005	-
$Rb_2O$	0,023	-	0,018
$ZnO$	0,013	0,009	0,008
$SrO$	0,006	0,004	0,018
$CuO$	-	0,009	-
$Y_2O_3$	0,006	0,004	0,004
$Ga_2O_3$	-	0,006	-

Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Fazendo referência ao teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , principal agente caracterizador da coloração avermelhada da cerâmica, é possível verificar que a argila B, apresenta baixo teor desse óxido (0,585%), possibilitando a obtenção de produtos de coloração clara.

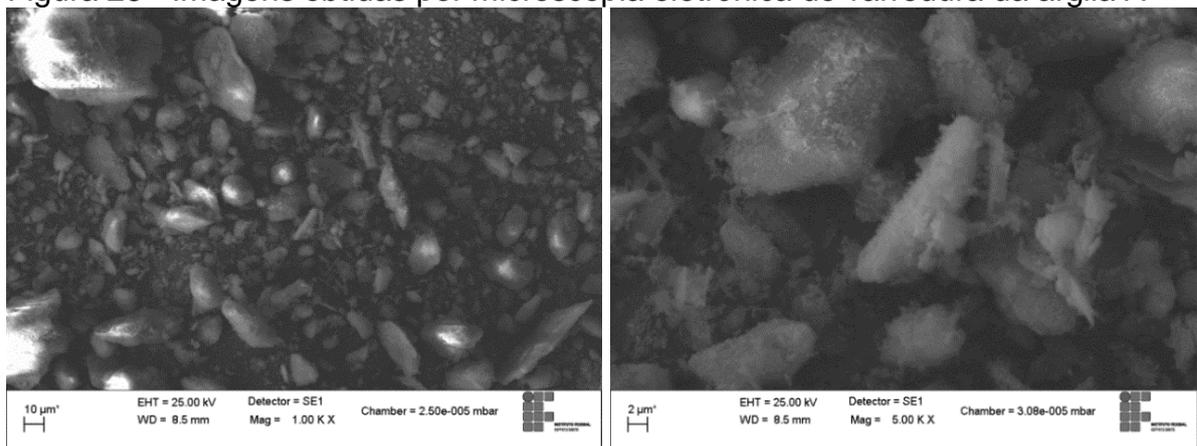
O RBRO apresenta teor de  $\text{SiO}_2$  de 65,751% indicando ser o resíduo proveniente de rochas predominantemente graníticas corroborando com o resultado apresentado na DRX.

### 5.1.5 Análise morfológica

As Figuras 28, 29 e 30 apresentam as microscopias eletrônicas de varredura em escala de 1000 e 5000 vezes possibilitando fazer análise do tamanho e forma dos grãos das matérias-primas utilizadas.

Nas Figuras 28 e 29 estão apresentadas as imagens das microscopias eletrônicas referentes à argila A e B, respectivamente. Através da análise dessas imagens é possível observar que esse material apresenta partículas de tamanhos e morfologia diferentes.

Figura 28 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da argila A

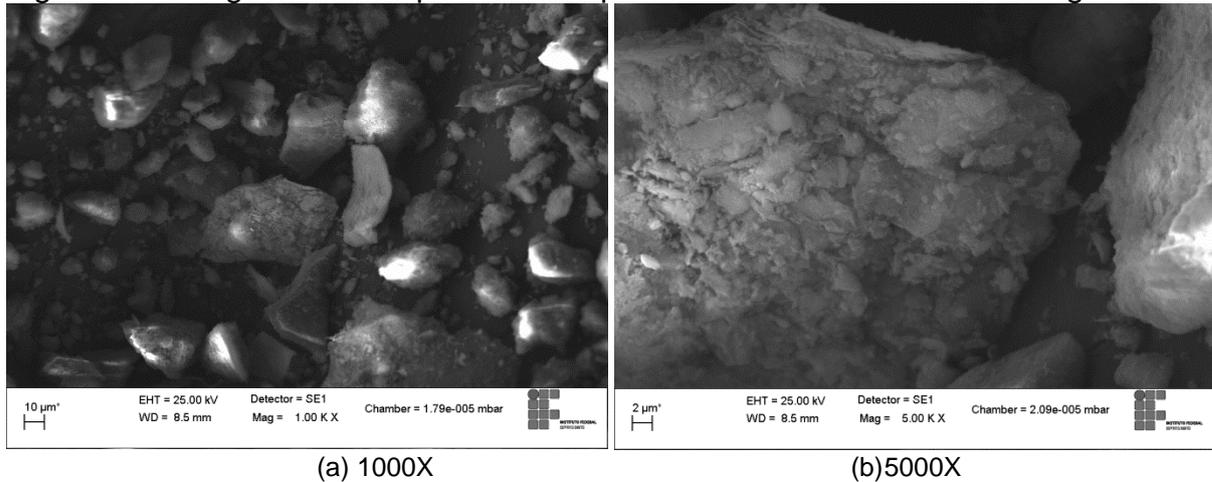


(a) 1000X

(b) 5000X

Fonte: Elaborado pela autora (2018)

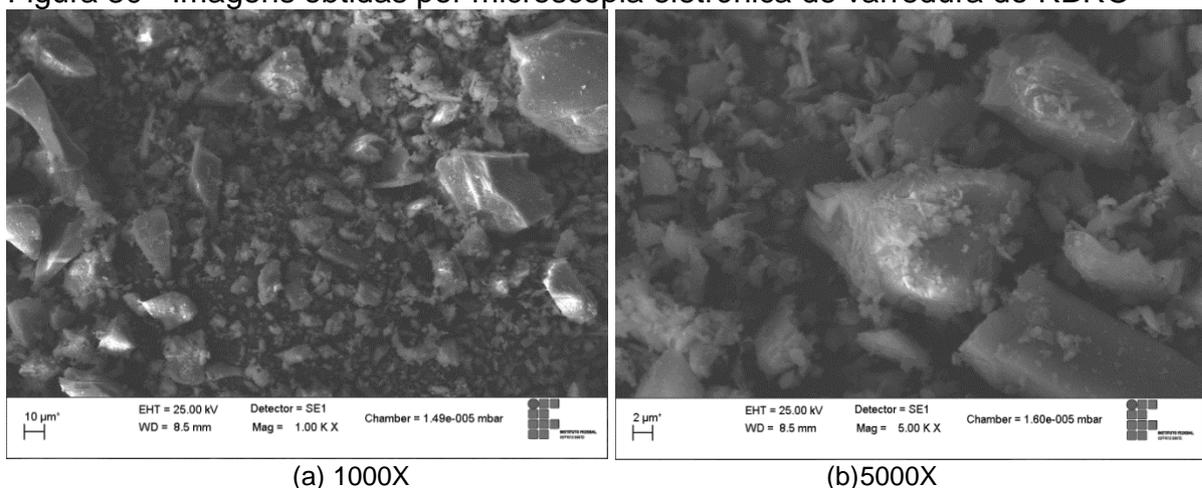
Figura 29 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da argila B



Fonte: Elaborado pela autora (2018)

As imagens que evidenciam o tamanho micrométrico das partículas e a ampla distribuição de tamanhos dessas partículas para o RBRO estão apresentadas na Figura 30. Através dessas imagens é possível identificar partículas de quartzo bem delineadas, com arestas angulosas e morfologia irregular, além de aglomerados porosos. As partículas finas contidas no resíduo, com porcentagem representativa, podem contribuir para redução da plasticidade na cerâmica e, conseqüentemente, redução do aparecimento de trincas, além de favorecer a dissolução de quartzo durante a etapa de queima.

Figura 30 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do RBRO



Fonte: Elaborado pela autora (2018)

TRAÇOS ESTUDADOS TR, T1 e T2

### 5.1.6 Análise granulométrica

Os percentuais granulométricos feitos por difração de laser dos traços estudados são apresentados na Tabela 8 e estão alinhados com a norma ABNT NBR 6502:95.

Tabela 8 - Distribuição de tamanho de partículas dos traços em estudo

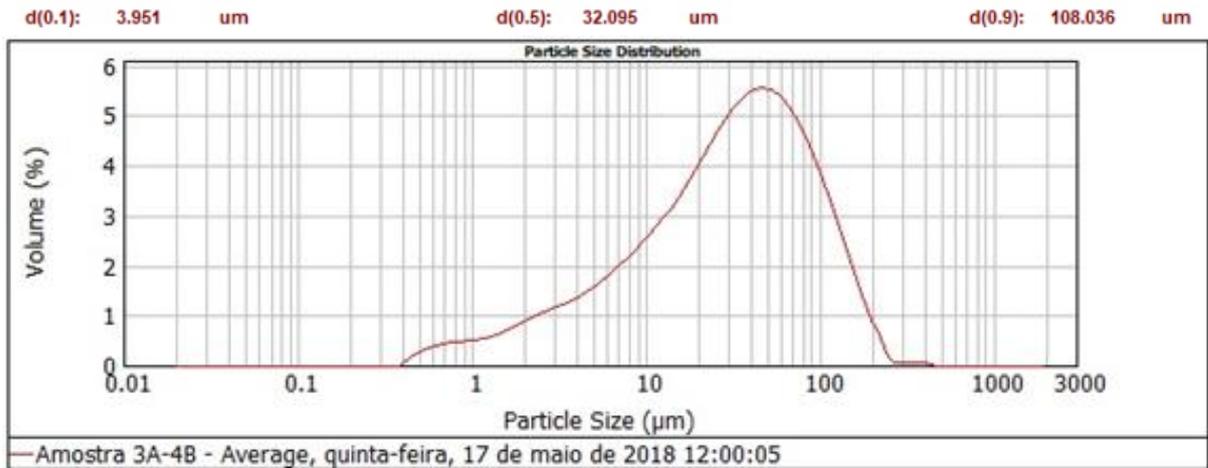
Traços	Fração argila <2 $\mu$ m	Silte (2 – 60) $\mu$ m	Areia (60 – 2000) $\mu$ m
TR	5,6	66,81	27,59
T1	6,98	69,68	23,34
T2	7,62	70,73	21,65

Fonte: Elaborado pela autora (2018)

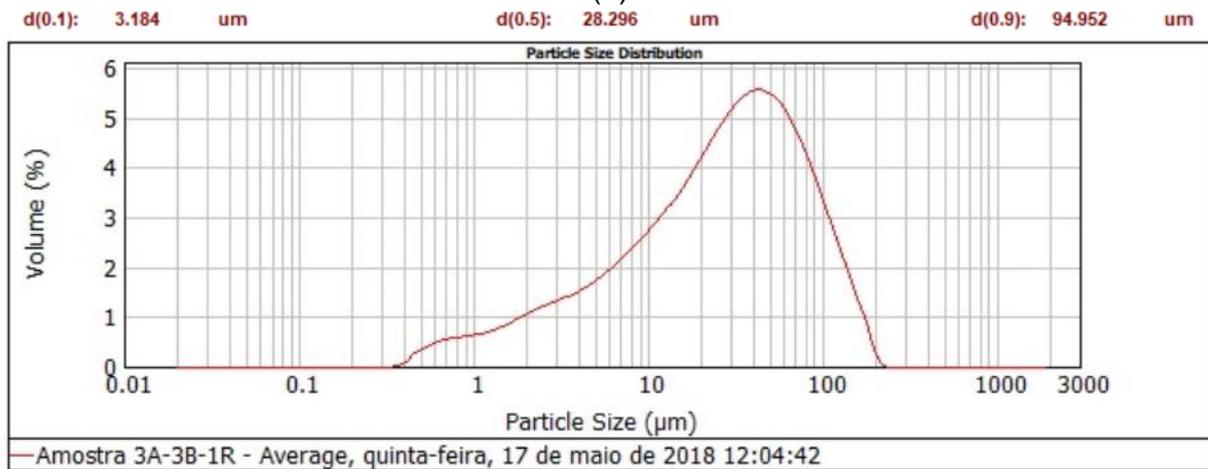
Observando a Tabela 8 é possível verificar que as massas cerâmicas referentes aos três traços são predominantemente siltosas e que o traço de referência (TR) apresenta maior fração de material mais grosso.

Nas Figuras 31a, 31b e 31c estão apresentadas as curvas granulométricas referentes aos traços TR, T1 e T2, respectivamente.

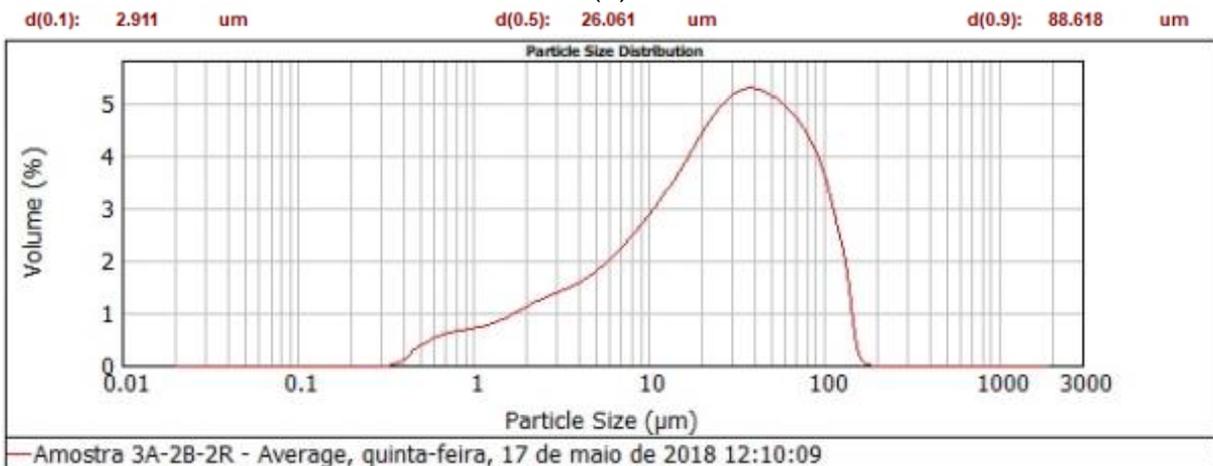
Figura 31 - Curvas granulométricas dos traços: (a) TR; (b) T1; e (c) T2



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Analisando as Figuras 31a, 31b e 31c, é possível verificar que 50% das partículas do TR têm diâmetro máximo de 32,095µm, 50% das partículas do T1 têm diâmetro

máximo de 28,296 $\mu$ m e 50% das partículas do T2 têm diâmetro máximo de 26,061 $\mu$ m, indicando que a substituição de parte da argila pelo RBRO deixou as massas cerâmicas com distribuição granulométrica mais fina.

### 5.1.7 Análise da plasticidade

A plasticidade dos traços estudados é avaliada por meio dos limites de Atterberg e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 9.

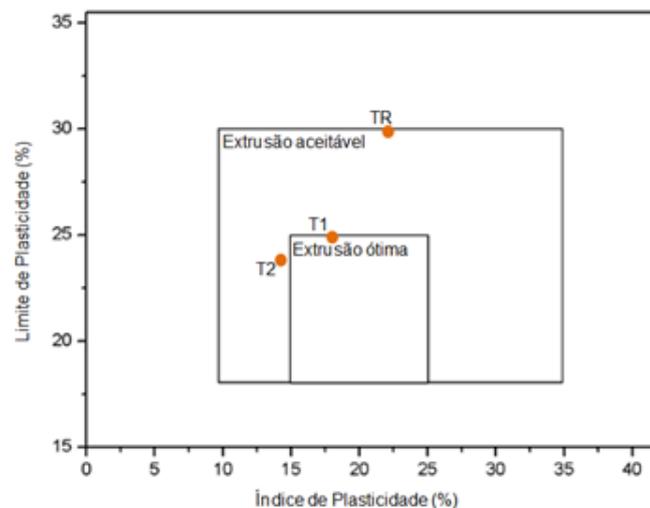
Tabela 9 - Limites de Atterberg e índice de plasticidade dos traços TR, T1 e T2

Limites de Atterberg e índice de plasticidade	Traços		
	TR	T1	T2
LL (%)	52	43	38
LP (%)	30	25	24
IP (%)	22	18	14

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Os resultados encontrados para os limites de plasticidade e para os índices de plasticidade dos traços em estudo apresentados na Tabela 9 são plotados na Figura 32.

Figura 32 - Prognóstico de extrusão das massas cerâmicas de acordo com Santos *et al.* (2012)



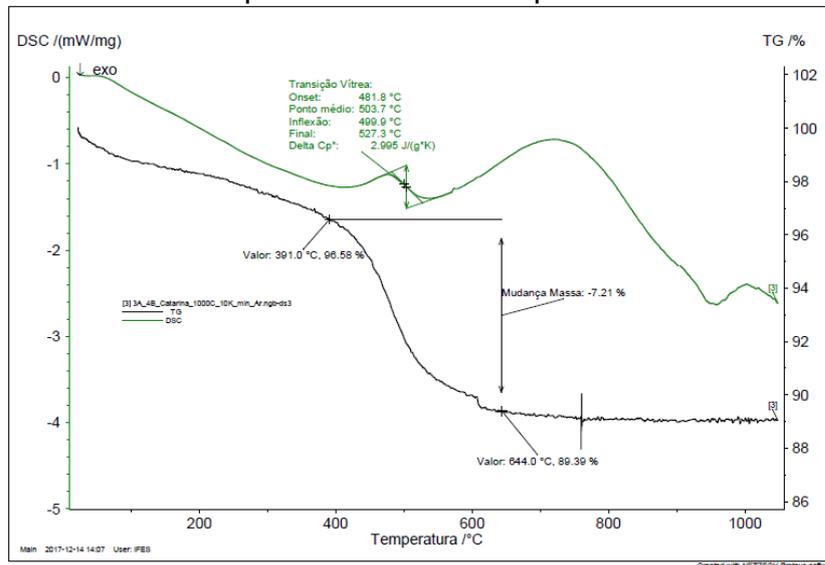
Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Analisando a Figura 32 é possível concluir que de acordo com Santos *et al.* (2012) os traços TR e T2 estudados se enquadram dentro do intervalo para extrusão aceitável, enquanto o traço T1 pertence ao intervalo para extrusão ótima.

### 5.1.8 Análise térmica

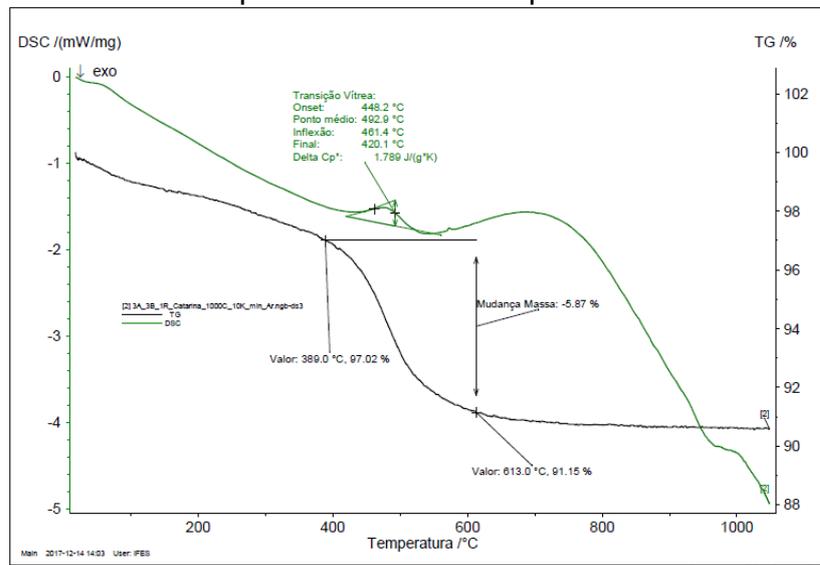
Nas Figuras 33, 34 e 35 é possível observar, respectivamente, as curvas DSC/ATG dos traços TR, T1 e T2.

Figura 33 - Curvas DSC/ATG para análise do comportamento térmico de TR



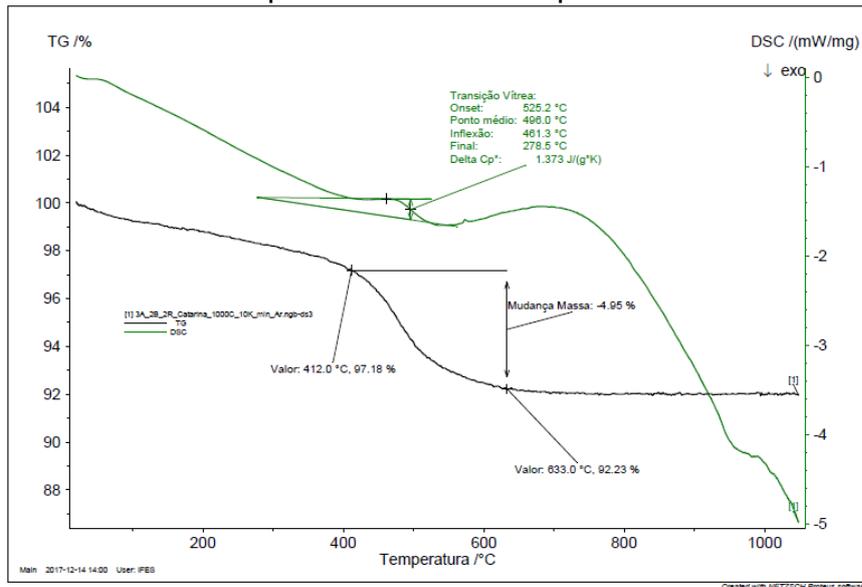
Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Figura 34 - Curvas DSC/ATG para análise do comportamento térmico de T1



Fonte: Próprio autor

Figura 35 - Curvas ATG/ DSC para análise do comportamento térmico de T2



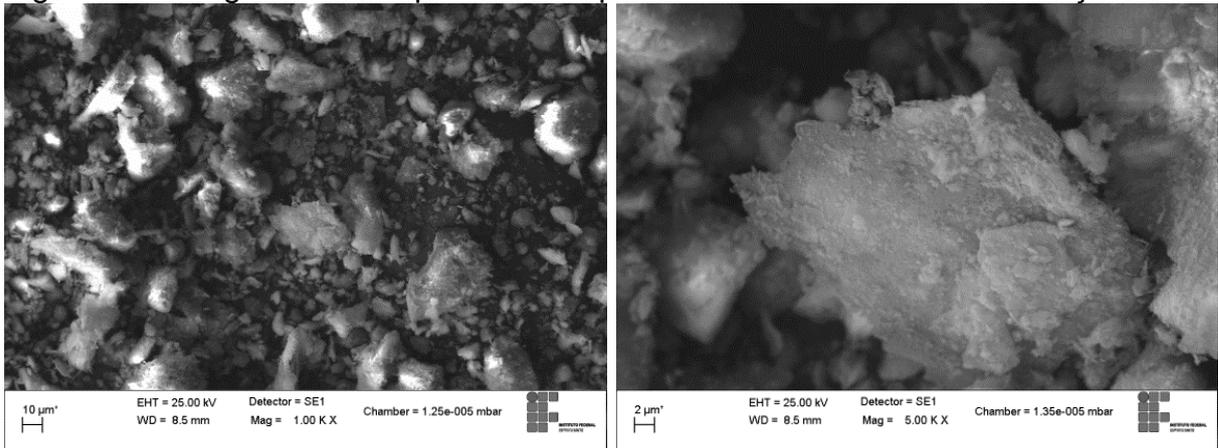
Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Analisando as Figuras 33, 34 e 35, é possível verificar que a menor perda de massa acontece no traço T2 (7,77%), em seguida está o traço T1 com 8,85% de perda e o traço TR com a maior perda de massa (10,61%), o que indica que a adição do resíduo faz reduzir a perda de massa e sugere menor retração de queima. O traço T2 é o que mais se aproxima da perda de massa ideal, pois de acordo com Vieira, Soares e Monteiro (2003) para que um material seja bem avaliado para o processamento cerâmico industrial, a perda de massa deve estar situada entre os valores de 5 e 7%.

### 5.1.9 Análise morfológica

Nas Figuras 36, 37 e 38 estão apresentadas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura dos traços TR, T1 e T2 nas escalas 1000 e 5000 vezes, nas quais é possível observar formas e tamanhos variados para essas composições do material e presença de maior teor de finos nos traços T1 e T2. As partículas maiores, que apresentam forma irregular, com cantos agudos, parecem ser partículas de quartzo enquanto as partículas finas, presentes em forma de aglomerados, indicam a presença da fração argila do material.

Figura 36 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do traço TR

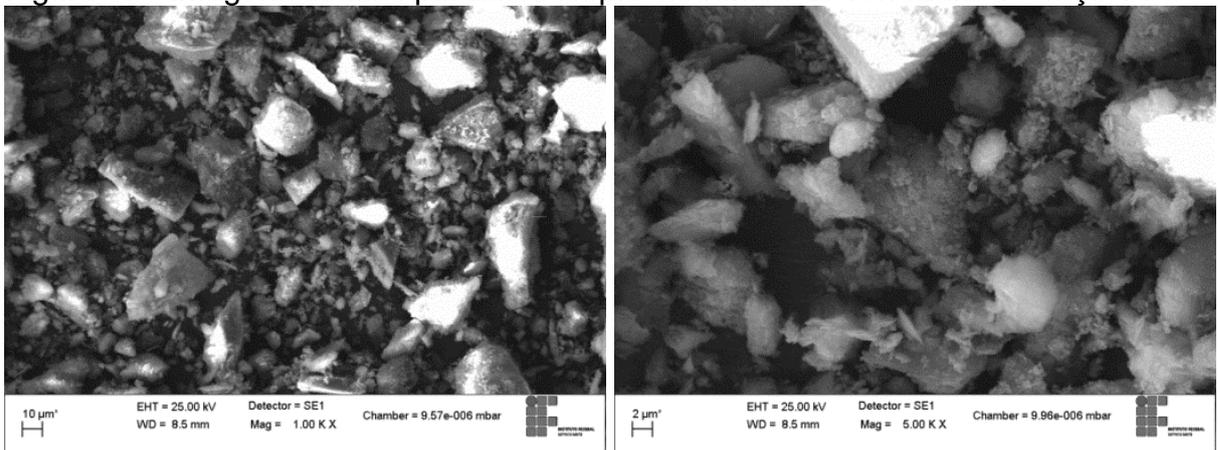


(a) 1000X

(b) 5000X

Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Figura 37 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do traço T1

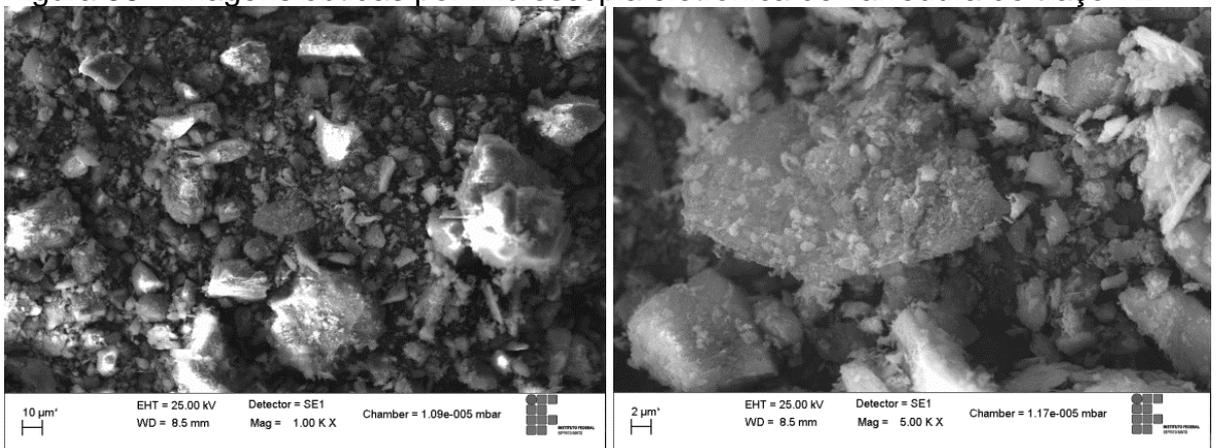


(a) 1000X

(b) 5000X

Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Figura 38 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do traço T2



(a) 1000X

(b) 5000X

Fonte: Elaborado pela autora (2018)

## 5.2 CORPOS DE PROVA

### 5.2.1 Caracterização física e mecânica

A umidade requerida para obter plasticidade de mistura que possibilite conformação adequada da massa cerâmica e a retração linear sofrida no processo de secagem em estufa, foi obtida através do cálculo da média aritmética dos 60 valores encontrados para cada um dos três traços estudados, e estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados da umidade e da RLS obtidos para os três traços estudados

Traços	Umidade (%)	Retração linear de secagem (%)
TR	10,33 ± 3,21	0,38 ± 0,21
T1	10,85 ± 0,58	0,34 ± 0,20
T2	10,14 ± 0,76	0,43 ± 0,22

Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Analisando os resultados apresentados na Tabela 10 é possível verificar que, em média, considerando os respectivos desvios padrões, os CPs obtidos a partir dos traços T1 e T2 obtiveram valores pertencentes ao intervalo de valores correspondentes a TR, podendo afirmar que os resultados apresentados para umidade e retração linear de secagem são similares para os três traços em estudo e que os valores obtidos para umidade estão abaixo do valor máximo citado por Rodrigues (2002), que considera excesso de umidade para conformação, valores superiores a 30%.

Para a determinação da absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, retração linear de queima e limite de resistência à compressão foram utilizados 20 CPs para cada um dos três traços estudados TR, T1 e T2 em cada temperatura de queima, 850°C, 900°C e 950°C, totalizando 180 CPs sinterizados. Foi realizada uma análise dos resultados com o objetivo de identificar os possíveis *outliers*, valores distantes dos demais, que podem afetar fortemente o resultado final. A identificação dos *outliers* foi por observação direta da tabela ou planilha de dados. Foram eliminados os cinco resultados mais dispersos. Para cada característica física

estudada foi calculada a média aritmética dos 15 resultados selecionados e o respectivo desvio padrão que estão apresentados na Tabela 11

Tabela 11 - Propriedades física e mecânica para os traços TR, T1 e T2

Temperaturas	Propriedades	Traços		
		TR	T1	T2
850°C	AA (%)	16,35±0,67	19,53±5,38	16,27±0,60
	PA (%)	30,06±0,84	34,16±7,63	29,96±1,11
	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	1,84±0,03	1,77±0,08	1,84±0,06
	RLQ (%)	0,51±0,25	0,54±0,22	0,30±0,13
	LRC (MPa)	39,95±2,63	30,60±3,22	27,61±4,27
900°C	AA (%)	16,68±0,75	18,39±0,70	17,20±0,82
	PA (%)	30,88±1,01	33,08±0,85	31,52±1,00
	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	1,85±0,03	1,80±0,02	1,83±0,03
	RLQ (%)	0,76±0,37	0,58±0,26	0,37±0,16
	LRC (MPa)	40,55±3,80	32,08±3,01	28,84±5,00
950°C	AA (%)	18,13±0,77	18,16±0,46	16,93±0,75
	PA (%)	32,89±0,94	32,78±0,54	32,66±5,41
	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	1,82±0,02	1,81±0,02	1,93±0,34
	RLQ (%)	0,67±0,30	0,51±0,21	0,31±0,12
	LRC (MPa)	40,03±3,41	33,26±4,11	30,68±3,96

Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Souza e Souza Santos (1964) estabeleceram valores de referência para absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente para corpos de prova cerâmicos, queimados à temperatura de 950°C, que estão apresentados na Tabela 12 enquanto valores da resistência à compressão e absorção de água de blocos cerâmicos para alvenaria de vedação, ABNT NBR 15270-1: 2017 encontram-se na Tabela 13.

Tabela 12 - Especificações para CPs queimados à temperatura de 950°C

Propriedades	AA (%)	PA (%)	MEA (%)
Especificações	< 25	≤ 35	≥ 1,70

Fonte: Elaborado pela autora adaptado de Souza e Souza Santos (1969)

Tabela 13 - Resistência mínima à compressão e absorção de água de blocos cerâmicos para alvenaria de vedação

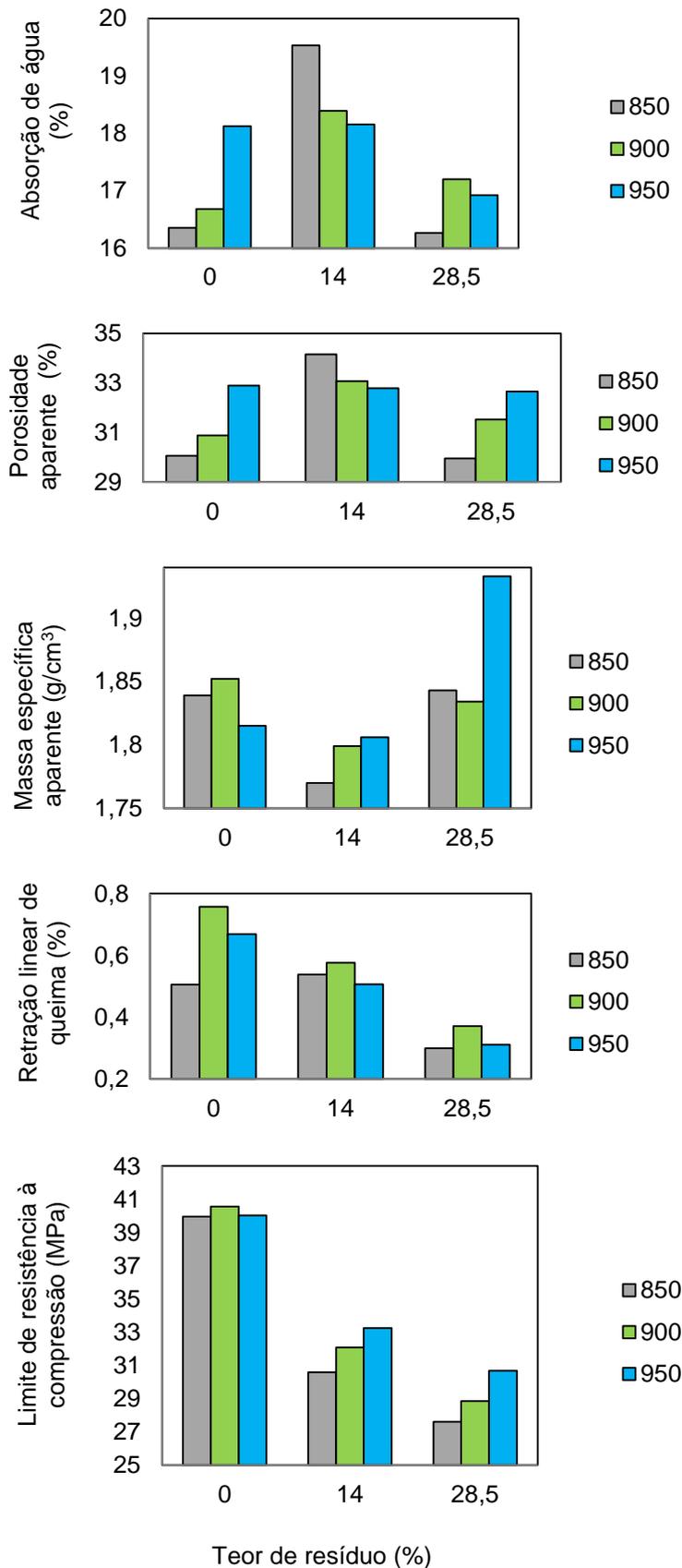
Posição dos furos	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
Para blocos usados com furos na horizontal	$\geq 1,5$	$8 \leq x \leq 22$
Para blocos usados com furos na vertical	$\geq 3,0$	$8 \leq x \leq 22$

Fonte: Elaborado pela autora adaptado de ABNT NBR 15270-1: 2017

Analisando os resultados obtidos nessa pesquisa apresentados na Tabela 11 é possível observar que absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente estão de acordo com o proposto por Souza e Souza Santos (1964) apresentado na Tabela 12. É possível também observar que os resultados alcançados, nos corpos de prova, para resistência à compressão e absorção de água estão em conformidade com a norma ABNT NBR 15270-1: 2017 apresentados na Tabela 13.

Na Figura 39 estão apresentados os gráficos, produzidos a partir dos resultados contidos na Tabela 11, referentes à absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, retração linear de queima e limite de resistência à compressão dos corpos cerâmicos obtidos a partir dos três traços em estudo após sinterização. Cada propriedade foi analisada em função do teor de resíduo, com percentual em volume, e da temperatura de sinterização em °C.

Figura 39 - Absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, retração linear de queima, limite de resistência à compressão



Fonte: Elaborado pela autora (2018)

Analisando os gráficos apresentados na Figura 39 é possível verificar que:

- A absorção de água aumenta com o uso de 14% de RBRO para as três temperaturas estudadas, sendo um aumento discreto para o corpo sinterizado na maior temperatura, mas segue diminuindo com o aumento do teor de resíduo, chegando a um valor menor que o valor para o TR na temperatura de 850°C. Essa tendência de diminuição da absorção com o aumento do teor de RBRO ocorre devido à possível melhoria de empacotamento, redução da quantidade de água de conformação e consequente redução de perda de massa durante a queima.
- A porosidade aparente do material segue comportamento similar ao da absorção de água, apresentando, no entanto, alterações muito pequenas com uso do RBRO para a temperatura de 950°C.
- A redução da absorção de água com o decréscimo da porosidade se dá como consequência da ação fundente do RBRO e consequente formação de fase líquida no processo de sinterização, preenchendo os poros e tornando mais denso o corpo cerâmico, indicativo de que a quantidade de fase líquida formada contribuiu para reduzir a porosidade.
- A massa específica aparente diminuiu para as duas menores temperaturas com o uso de 14% do RBRO, tem um leve aumento para temperatura de 950°C e segue aumentando com o aumento do índice do RBRO para as três temperaturas, corroborando com as análises anteriores.
- A retração linear de queima aumenta com o uso de 14% de RBRO para a temperatura de 850°C e segue diminuindo com o aumento do teor de resíduo. Para as demais temperaturas (900°C e 950°C), a retração diminui para os dois teores de resíduo (14% e 28,5%). Observa-se ainda menor retração para a temperatura de 850°C, quando comparada às demais temperaturas, no traço de referência, e valores bem próximos para as três temperaturas estudadas, nos traços T1 e T2.
- O limite de resistência à compressão apresenta valores aproximados para as três temperaturas estudadas no traço de referência e valores maiores para as temperaturas maiores nos traços T1 e T2. É possível ainda verificar que a tensão de ruptura diminui com o uso do RBRO para as três temperaturas e

segue diminuindo com o aumento do teor do resíduo corroborando com os resultados obtidos por Menezes *et al.* (2008), Monteiro, Peçanha e Vieira (2004), Moreira, Freire e Holanda (2003) e Vieira *et al.* (2004) que verificaram redução da resistência para todos os teores de resíduo utilizados. Essa redução da resistência pode estar associada a mudanças de fases do quartzo que provocam aumento de volume do corpo cerâmico, gerando microtrincas, que atuam como concentradores de tensão, reduzindo a resistência mecânica.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

Durante o desenvolvimento desse trabalho diversos ensaios foram realizados para avaliar a influência nas propriedades físicas e mecânicas, resultante da substituição de parte da argila menos plástica de uma massa cerâmica vermelha, pelo resíduo proveniente da lama do beneficiamento de rochas ornamentais, sendo possível concluir que:

- A argila A ensaiada é altamente plástica, conforme avaliado através da determinação dos limites de Atterberg e índices de plasticidade e através da análise mineralógica que identifica picos de caulinita, ilita e montmorilonita, argilominerais que conferem plasticidade às argilas e requerem maior quantidade de água para conformação, sugerindo adição de material redutor de plasticidade.
- O melhor resultado para perda de massa obtido na análise térmica acontece para o traço T2 por ser o resultado que mais se aproxima do intervalo de perda de massa ideal, 5 a 7.
- Uma vez que o traço com maior teor de resíduo foi o que mais se aproximou do intervalo ideal de perda de massa, é sugestivo o aumento do teor de resíduo, para que a perda de massa se enquadre no intervalo, e, conseqüentemente, necessite de menor quantidade de água para conformação.
- Com a substituição de 14% da argila menos plástica do traço de referência pelo RBRO foi possível obter uma massa cerâmica com melhor condição de extrusão, se enquadrando na condição de extrusão ótima.
- A substituição de 28,5% da argila menos plástica pelo RBRO resultou em massa cerâmica mais densa, provavelmente, em virtude do poder inerente a esse material, que além de atuar como redutor de plasticidade pode agir como formador de fase vítrea, preenchendo poros ou servindo como matriz vítrea ligante de grãos cristalinos.

- O traço T2 obtido com maior quantidade de RBRO deu origem a corpos cerâmicos menos porosos e conseqüentemente com baixos percentuais de absorção de água.
- A retração de queima assume valores pequenos para o maior teor de resíduo, e que os valores estão bem próximos nas três temperaturas avaliadas.
- Mesmo sabendo que muitas propriedades são melhoradas com a inserção do RBRO, é preciso sempre avaliar as características e propriedades do material, alertando para a necessidade de obediência à norma específica para cada produto final desejado.
- As massas cerâmicas produzidas através da mistura das argilas A e B e RBRO podem ser consideradas para a fabricação de blocos cerâmicos.
- É viável a utilização do resíduo proveniente da lama do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) como substituto parcial da argila menos plástica, nos dois teores de substituição estudados, na produção de uma massa cerâmica para confecção de blocos cerâmicos, resguardando a importância de observância de norma específica para os demais produtos de cerâmica vermelha.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Testar índices maiores de substituição para o RBRO e novas temperaturas de queima.
- Avaliar influência do ferro, componente do resíduo, no produto.
- Preparar produto específico, tijolos e telhas, com os traços estudados nessa pesquisa e avaliar propriedades físicas e mecânicas dos produtos.
- Avaliar viabilidade econômica da utilização do RBRO em produto específico de cerâmica vermelha.
- Avaliar ciclo de vida para inserção do resíduo em material cerâmico.

## REFERÊNCIAS

- ACCHAR, W.; VIEIRA, F. A.; HOTZA, D. Effect of marble and granite sludge in clay materials. **Material Science and Engineering**, v. 419, p. 306-309, 2006.
- ACCHAR, W.; VIEIRA, F. A.; SEGADÃES A. M. Using ornamental stone cutting rejects as raw materials for red clay ceramic products: properties and microstructure development. **Material Science and Engineering**, v. 435, p. 606-610, 2006.
- ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; SANTOS, J. R. Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. **Building and Environment**, v. 42. p. 810-819, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2017. Informe ABIROCHAS. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/03/Informe-01-2018-Balanco-2017.pdf>>. Acesso: em 11 jul. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABCERAM). Informações técnicas - Processos de fabricação. São Paulo, 2016 a. Disponível em: <<http://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>>. Acesso em: 04 mar. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABCERAM). Informações técnicas – Definição e classificação. São Paulo, 2016 b. Disponível em: <<http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>>. Acesso em: 01 abr. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABCERAM). Cerâmica vermelha. São Paulo, 2016 c. Disponível em: <<http://abceram.org.br/ceramica-vermelha/>>. Acesso em: 03 abr. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABCERAM). Cerâmica no Brasil – número do setor. São Paulo, 2016 d. Disponível em: <https://abceram.org.br/numeros-do-setor/#>. Acesso em 11 de jul. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos- Blocos e tijolos para alvenaria - parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2017.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 15012**: Rochas para revestimentos de edificações Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). Dados do setor. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>>. Acesso em 28 jul. 2018.

BEZERRA, F. D. Rochas ornamentais: novas perspectivas de investimentos. **Caderno setorial ETENE**, Fortaleza, a. 2, n. 21, dezembro, 2017. Disponível em: <[https://www.bnb.gov.br/documents/80223/2809571/21\\_rochas\\_12-2017%28V4%29.pdf/c33b4967-7c88-d155-0b44-6052618f1301](https://www.bnb.gov.br/documents/80223/2809571/21_rochas_12-2017%28V4%29.pdf/c33b4967-7c88-d155-0b44-6052618f1301)>. Acesso em 12 de jul. 2018.

BORIES, C; BORREDON M. E; VEDRENNE E.; VILAREM, G. Development of eco-friendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review. **Journal of environmental management**, v.143, p. 186-196, 2014.

BRASIL. Lei nº 12305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispendo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. **Diário oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 02 ago. 2010. Disponível em: <[www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 24 fev. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Relatório técnico 33- Perfil de rochas ornamentais e de revestimento. Brasília, 2009. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P23\\_RT33\\_Perfil\\_de\\_Rochas\\_Ornamentais\\_e\\_de\\_Revestimento.pdf/d6f58aa1-b01a-4da1-a178-e6052b2fc8e5](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P23_RT33_Perfil_de_Rochas_Ornamentais_e_de_Revestimento.pdf/d6f58aa1-b01a-4da1-a178-e6052b2fc8e5)>. Acesso em: 28 de abril. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos. Brasília, 2017. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANU%C3%81RIO+N%C3%83O-METALICOS+2016\\_vers%C3%A3o+3.pdf/3fe29fc2-116e-4566-8324-c2c91a94fabe](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANU%C3%81RIO+N%C3%83O-METALICOS+2016_vers%C3%A3o+3.pdf/3fe29fc2-116e-4566-8324-c2c91a94fabe)> Acesso em: 11 de jul. 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANU%C3%81RIO+N%C3%83O-METALICOS+2017+27.03.2018.pdf/d20dce50-bfe8-4718-8924-129038887835>>. Acesso em: 11 de jul. 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Sumário Mineral. Departamento Nacional de Produção Mineral . Brasília, 2015. Disponível em:

<<http://www.dnmp.gov.br/dnmp/sumarios/sumario-mineral-2015>>. Acesso em: 02 mai. 2017.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÉLLO, F. S. S.; SILVA, S. A. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, p. 64-75. 1997.

CARTER, C. B.; NORTON, M.G., **Ceramic materials: science and engineering**. Berlim, Springer Science & Business Media, 2007.

CASAGRANDE, M, C.; SARTORA, M. N.; GOMES, V.; DELLA V. P.; HOTZA D.; OLIVEIRA, A. P. N. Reaproveitamento de Resíduos Sólidos Industriais: Processamento e Aplicações no Setor Cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v.13, p. 34-42. 2008.

CORREIA, S. L.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M., “Otimização da resistência mecânica de corpos cerâmicos em função de matérias primas e restrições de propriedades tecnológicas”, **Cerâmica**, v. 51, p. 230-238, 2005.

DAGOSTIM, B. R. Fabricação de Pavimentos Cerâmicos e Cerâmica Celular a partir da Reutilização de Resíduos Sólidos – Adequação Laboratorial e Industrial **Cerâmica industrial**, v. 13, n. 6, p. 25-27, 2008.

DHANAPANDIAN, S.; GNANAVEL, B. Investigation on the effect of incorporation of granite and marble wastes in the production of bricks. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 4, n. 9, p. 46-53, 2009.

DESTEFANI, A. Z. **Adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para a produção de blocos prensados de encaixe**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ. 2009.

EMMERICH, K.; STEUDEL, A. Análise térmica de matérias-primas argilosas. **Cerâmica industrial**, v. 21, n.2, p. 14-19, 2016.

FREIRE, A.S.; MOTTA, J.F. Potencialidades para aproveitamento econômico do rejeito da serragem do granito. **Rochas de Qualidade**, São Paulo, v.16, n.123, p.98-108, 1995.

GASPARETO, M. G. T.; TEIXEIRA, S.R. Utilização de resíduo de construção civil e demolição (RCD) como material não plástico para a produção de tijolos cerâmicos. **Cerâmica industrial**, v.22, n.2, p. 40-46, 2017.

GIARDULO. P. **O nosso livro de cerâmica**. São Paulo: Polo produções, 2005

GOTTARDI, E. V. **Aproveitamento dos resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória moída de aciaria como fíler em pavimentos de concreto asfáltico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de

Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

HAMZA, R. A.; EL-HAGGAR, S.; KHEDR, S. Utilization of marble and granite waste in concrete bricks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND BIOSCIENCE, 2011, Singapura. **Anais...** Singapura: IPCBEE, 2011. p. 115-119.

HOJAMBERDIEV, M.; EMINOV, A.; XU, Y. Utilization of muscovite granite waste in the manufacture of ceramic tiles. **Ceramics international**, v. 37, p. 871-876, 2011.

HOLANDA J. N. F.; SALEIRO, G. T., Processing of red ceramic using a fast-firing cycle. **Cerâmica industrial**, v. 58, p. 393-399, 2012.

JORDÃO, M.A.P.; ZANDONADI, A.R. **Informações Técnicas**: Anuário brasileiro de cerâmica. São Paulo: ABC, 2002 - p. 26-64.

KAZMIERCZAK, C. S.; Produtos de cerâmica vermelha. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo, IBRACON, 2007.

MACÊDO, A. N.; COSTA D. H. P.; TRINDADE, S. R. S.; SOUZA, J. A. S.; CARNEIRO, R. J. F. M. Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila. **Ambiente construído**, v. 11, n.4, Porto Alegre, dez. 2011.

MACEDO, R. S; MENEZES R. R.; NEVES G. A.; FERREIRA H. C. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 54, p. 411-417, 2008.

MANHÃES, J.P.V.T., HOLANDA, J.N.F., Caracterização e Classificação de resíduo Sólido - Pó de Rocha Granítica Gerado na Indústria de Rochas Ornamentais. **Química Nova**, v. 31, n.6, p. 1301-1304, 2008.

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

MARINHO, E. Z. ; ROCHA, R. C.; GALDINO, A. G. S. Análise e perspectivas de alternativas para destinação de resíduos de rochas ornamentais através de um estudo bibliométrico. **Espacios**, Caracas, v. 38, p. 22, 2017.

MATOS, A. T. **Poluição Ambiental**: impactos no meio físico. Viçosa MG: UFV, 2010. 260p.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. L. L. Utilização de resíduos industriais da produção de agregados na produção de tijolos e telhas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45., 2001, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABC, 2001.

- MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 303-313, 2002.
- MENEZES, R. R.; MALZAC NETO, H. G.; SANTANA L. N. L.; LIRA, H. L.; FERREIRA H. S.; NEVES, G. A. Optimization of wastes content in ceramic tiles using statistical design of mixture experiments. **Journal of the European Ceramic Society**, v.28, p. 3027-3039, 2008.
- MONTEIRO, C. M. O. L. **Noções básicas do processo produtivo de cerâmica vermelha**. Centro de Tecnologia da Cerâmica "Wildson Gonçalves". Piauí: Senai, 2007.
- MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F., Influência da temperatura de queima na microestrutura de argilas de Campos dos Goytacazes-RJ. **Cerâmica** v. 49, p 6 – 10, 2003.
- MONTEIRO S. N.; PEÇANHA L. A.; VIEIRA, C. M. F. Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 24, p. 2349-2356, 2004.
- MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 49, n. 312, Out./ Dec. 2003.
- MOTA, J. D. Caracterização e avaliação da lama abrasiva proveniente do corte de rochas ornamentais: um estudo comparativo. In: CONGRESSO QUÍMICO DO BRASIL, Natal, 2, 2012, . **Anais...** Natal: URFN, 2012.
- MOTTA, J. F. M.; JUNIOR, M. C.; TANNO, L. C.; ZANARDO, A. As matérias primas cerâmicas. Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. **Cerâmica industrial**, v.7, n.1, p. 33-40, 2002.
- MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 64, n.2, 2011.
- NEVES, G.A.; PATRÍCIO S.M.R.; FERREIRA H.C. Utilização de resíduos da serragem de granito para confecção de tijolos cerâmicos. **Interação**, Campina Grande, v.1, p.3-8, 2000.
- PEDROTI L. G.; VIEIRA C. M. F.; ALEXANDRE J.; MONTEIRO S. N.; XAVIER G. C. Dosagem de massa cerâmica para blocos prensados com adição de resíduo de granito através do método simplex. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CERÂMICA. 1., 2012, Curitiba, PR. **Anais...** Curitiba: ABC, 2012.
- PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 56, n. 339, jul. 2010.

PINHEIRO, R.M.; VIEIRA C. M. F.; RODRIGUEZ R. S.; MONTEIRO S. N. Reciclagem de resíduo proveniente da produção de papel em cerâmica vermelha. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 220-227, 2008.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v.2, n.1/2, p. 31-35, 1997.

**Produtores de rochas ornamentais brasileiras se preparam para um ano com novo aumento nas exportações.** Vitória: Vitória Stone Fair, 2016. Disponível em: <<http://www.vitoriastonefair.com.br/site/2016/pt/destaque/1207/produtores+de+rocha+s+ornamentais+brasileiras+se+prepararam+para+um+ano+com+novo+aumento+na+s+exportacoes>>. Acesso em: 30 abr. 2017.

RAIGÓN, P.M.; GARCIA, R.G.; SÁNCHEZ, S.P.J. Characterization of waste washing solid product of mining granitic tin-bearing sands and its application as ceramic raw material. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v.17, n.2, p.109-124, 1996.

REIS, A.S. **Estudo de aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória – ES, 2008.

RIBEIRO, M. J.; FERREIRA A. A. L.; LABRINCHA J. A. Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas. **Cerâmica Industrial**, v. 8, n.1, p.37-42, 2003.

RODRIGUES, M. M. B. **Proposta de modelo de qualificação evolutiva para empresa fabricantes de blocos e telhas de cerâmica vermelha.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2002.

SABOYA JR. F.; XAVIER G. C.; ALEXANDRE, J. The use of the poder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. **Construction and building materials**, v. 21, p. 1950-1960, 2007.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**. v. 121, p.19-32, 2016.

SANTOS, C. V. P.; SILVA A. R.; FILHO M. A. S. G.; NETO E. F.; RABELO A. A. Índice de plasticidade e análise racional de argilas de Marabá (PA) para avaliação das zonas de extrusão. **Cerâmica Industrial**, v.17, n. 2, p.25-27, 2012.

SANTOS, J. G. Caracterização da lama abrasiva gerada nos processos de beneficiamento do granito: um estudo de caso na Granfugi localizado em campina grande – PB. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30, 2010, São Carlos/SP. **Anais...** São Carlos/SP: ABEP, 2010.

SANTOS, M. M. A.; DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, 2013.

SARDOU FILHO, R., MATOS, G. M. M., MENDES, V. A., IZA, E. R. H. F. **Atlas de rochas ornamentais do Espírito Santo. Projeto geologia e recursos minerais do estado do Espírito Santo**. Serviço geológico do Brasil (CPRM). Ministério de minas e energia. Brasília, 2013. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17787>. Acesso em: 28 abr. 2017.

SEGADÃES, A. M.; CARVALHO, M. A.; ACCHAR, W. Using marble and granite rejects to enhance the processing of clays products. **Applied clay Science**, v. 30, p.42-52, maio 2005.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). Boletim de inteligência. Cerâmica vermelha – Dez. 2015. Disponível em: <[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS\\_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/\\$File/5846.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/$File/5846.pdf)>. Acesso em 10 de mar. 2016.

SIEGISMUND, S.; SNETHLAGE, R. **Stone in Architecture: properties, durability**. N Y, Springer, 2014.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS, CAL E CALCÁRIO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO (SINDIROCHAS). **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo- Rochas Ornamentais**. Manual 2013. Disponível em: <[www.sindirochas.com/arquivos/manual-rochas.pdf](http://www.sindirochas.com/arquivos/manual-rochas.pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2017.

SMITH, LAUREN - CENTRO BRASILEIRO DOS EXPORTADORES DE ROCHAS ORNAMENTAIS (CENTROROCHAS). EUA mantém liderança na importação de rochas ornamentais do Brasil. CENTROROCHAS, 2018. Disponível em: <<https://www.onevoexpress.com/site/eua-mantem-lideranca-na-importacao-de-rochas-ornamentais-do-brasil/>>. Acesso em: 09 de jul. de 2018.

SOUZA A. J.; PINHEIRO B. C. A.; HOLANDA J. N. F. Recycling of gneiss rock waste in the manufacture of vitrified floor tiles. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 685-689, 2010.

SOUZA A. J.; PINHEIRO B. C. A.; HOLANDA J. N. F. Influence of the incorporation of ornamental rock waste on the properties and sintered microstructure of floor tile. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 18, n.1, 2013.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e tecnologia de argilas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. v. 1.

SOUZA, J. V.; SOUZA SANTOS, P., Ensaios preliminares de argilas visando à utilização cerâmica, **Cerâmica**, São Paulo, v. 11, n. 38, 1964.

TEIXEIRA, A. F. N.; MELO, L. B.; OLIVEIRA, N. S. M. Rochas ornamentais: o desenvolvimento econômico e suas relações com a sociedade brasileira e nordestino-grandense. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7., 2012, Palmas. **Anais...** Palmas: CONNEPI, 2012.

ULIANA J. G.; BASTOS, R. S.; CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L.; RODRIGUES, J. A. Estudo comparativo da caracterização da lama do beneficiamento de rochas ornamentais com e sem granalha de aço. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55º, 2013, Gramado. **Anais...** Gramado: IBRACON, 2013.

VEIGA, José Eli. **Desenvolvimento sustentável**: o desafio do século XXI. Rio de Janeiro: Garamond, 2010.

VIEIRA, C. M. F.; EMILIANO, J. V., Incorporação de pó de rocha sedimentar em massas para telhas cerâmicas, Parte 1: Efeitos nas propriedades físicas e mecânicas. **Cerâmica**, v. 59, 389-394, 2013.

VIEIRA, C.M.F., SOARES, T.M., MONTEIRO, S.N. Massas cerâmicas para telhas: características e comportamento de queima. **Cerâmica**, n. 49, p. 245-250, 2003.

VIEIRA, C.M. F.; SOARES, T. M.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N. Incorporation of granite waste in red ceramics. **Materials Science and Engineering**, v. 373, p. 115-121, 2004.

VIEIRA, C.M.F., TERRONES, L.A., SANCHEZ, R., MONTEIRO, S.N. Características e efeito da fração granulométrica <2 µm no comportamento de queima de uma argila. **Cerâmica**, v.53, p.249-254, 2007.

VIEIRA, M.T. et al. Optimization of the sintering process of raw materials wastes. **Journal of Materials Processing Technology**, Lausanne, v.92-93, p.97-101, 1999.

VITORINO, J. P. D.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA C. M. F. Caracterização e incorporação de resíduos provenientes de Estação de Tratamento de Água em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, v. 55, p. 385-392, 2009.

ZHANG, L. Production of bricks from waste materials- a review. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 643-655, 2013.