

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE COMPOSICIONAL DOS RESÍDUOS DE
ROCHAS ORNAMENTAIS EM PROPRIEDADES FÍSICAS E
MICROESTRUTURAS DE CERÂMICA VERMELHA**

ANA JÚLIA NALI GIORI

ALEGRE, ES

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE COMPOSICIONAL DOS RESÍDUOS DE
ROCHAS ORNAMENTAIS EM PROPRIEDADES FÍSICAS E
MICROESTRUTURAIS DE CERÂMICA VERMELHA**

ANA JÚLIA NALI GIORI

ALEGRE, ES

2018

Ana Júlia Nali Giori

**INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE COMPOSICIONAL DOS RESÍDUOS DE
ROCHAS ORNAMENTAIS EM PROPRIEDADES FÍSICAS E
MICROESTRUTURAIS DE CERÂMICA VERMELHA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Engenharia Química

Linha de Pesquisa: Materiais, Bioprocessos e Meio Ambiente

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a Mirna Aparecida Neves

Coorientadora: Prof.^a. Dr.^a Simone Pereira Taguchi Borges

ALEGRE, ES
AGOSTO 2018

**INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE COMPOSICIONAL DOS RESÍDUOS DE
ROCHAS ORNAMENTAIS EM PROPRIEDADES FÍSICAS E
MICROESTRUTURAIS DE CERÂMICA VERMELHA**

Ana Júlia Nali Giori

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Examinado em 07 de agosto de 2018.

Prof.^a. Dr.^a Mirna Aparecida Neves
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof.^a. Dr.^a Damaris Guimarães
Universidade Federal do Espírito Santo

Dr.^a Mônica Castoldi Borlini Gadioli
Centro de Tecnologia Mineral

*“Dedico este trabalho à minha família,
pois sem o carinho e incentivo de vocês
eu não teria chegado até aqui.”*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por estar sempre presente em todos os momentos, me ungindo de capacidade e perseverança.

Aos meus pais, José Henrique e Cláudia Neide, por sempre acreditarem que a educação deve ser a base de qualquer ser humano.

À minha irmã, Ana Alice, por todo apoio e compreensão.

À minha Orientadora, Prof.^a. Dr.^a Mirna Aparecida Neves, por todo incentivo e parceria no decorrer do projeto.

Aos professores e banca de qualificação e defesa, Prof.^a. Dr.^a Damaris Guimarães, Prof. Dr. Christiano Pinheiro e Dr.^a Mônica Castoldi Borlini Gadioli, por ajudarem na construção e revisão deste trabalho.

Às minhas amigas Rhynara, Flaviane, Rayane, Talita, Thais e Rhuany, por todas as palavras, apoio, carinho e compreensão durante esses dois anos. Esse trabalho tem um pouco de cada uma de vocês e sinto que essa conquista é de todas nós.

Ao Rodrigo, obrigada por todo apoio e por tantas horas ao telefone conversando sobre cerâmica.

Aos técnicos Flaviane e Pedro, obrigada pela ajuda em todos os problemas que surgiram durante os experimentos, esse trabalho também é de vocês.

À FAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

GIORI, Ana Júlia Nali. **Influência da Variabilidade Composicional dos Resíduos de Rochas Ornamentais em Propriedades Físicas e Microestruturais de Cerâmica Vermelha**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES. Orientadora: Prof.^a. Dr.^a Mirna Aparecida Neves. Coorientadora: Prof.^a. Dr.^a Simone Pereira Taguchi Borges.

A geração de resíduos é um problema mundial, principalmente quando esses são depositados em locais impróprios, causando a contaminação de águas e solos. Todos os dias são geradas grandes quantidades de resíduos durante o processo de beneficiamento de rochas ornamentais. Porém, esses resíduos podem ser utilizados na fabricação de peças cerâmicas e possuem uma função específica dentro da massa, não só utilizado como preenchimento, mas como material fluxante. O objetivo desse trabalho foi caracterizar, por meio de análises de difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX), 33 amostras de rejeitos de distintas rochas ornamentais coletadas em indústrias de beneficiamento no município de Cachoeiro de Itapemirim sul do Estado do Espírito Santo, e analisar como a variação composicional desses resíduos podem influenciar nas características da cerâmica vermelha. Foram confeccionados corpos de prova com 20% em massa de resíduo em uma matriz cilíndrica de 37 mm de diâmetro e depois, secos em estufa a 110 °C por 24 horas e sinterizados em forno de queima cerâmica a 1000 °C por 1 hora. Os testes realizados para essa análise foram os de retração volumétrica, massa específica real, massa específica aparente, densidade aparente, absorção de água, e microscopia óptica. Observou-se que todos os corpos de prova cerâmicos incorporados com resíduos de rochas ornamentais estão de acordo com as normas estabelecidas para absorção de água. Contudo, os corpos de prova com resíduos de rochas silicáticas apresentaram menores valores de absorção de água.

Palavras-chave: lama abrasiva, rocha ornamental, cerâmica.

ABSTRACT

GIORI, Ana Júlia Nali. **Influence of the Compositional Variability of Dimension Stone Wastes on Properties of Red Ceramic**. 2018. Dissertation. (Master degree in Chemical Engineering) – Federal University of Espírito Santo, Alegre, ES. Adviser: Prof.^a. Dr.^a Mirna Aparecida Neves. Co-adviser(s): Prof.^a. Dr.^a Simone Pereira Taguchi Borges.

Generation of wastes is a worldwide problem, especially when it is deposited in inappropriate places, causing contamination of water and soil. Every day large amounts of waste are generated during the process of dimension stone processing. However, these residues can be used in the manufacture of ceramic products and have a specific function within the mass; they are not used only as filler, but as fluxing material. The aim of this work is to characterize, through x-ray diffraction (XRD) and x-ray fluorescence (FRX) analyzes, 33 samples of fine wastes from different kinds of rocks collected at Cachoeiro de Itapemirim's industries, in the State of Espírito Santo, Southeastern Brazil, and to analyze how the compositional variation of these residues can influence the characteristics of red ceramics. Test specimens were prepared with 20% by mass of residue in a round matrix of 37 mm diameter and then sintered in a ceramic firing oven at 1000 °C for 1 hour. The tests performed for this analysis were those of volumetric shrinkage, real specific mass, apparent specific mass, apparent density, water absorption, and optical microscopy. It has been observed that all ceramic specimens incorporated with residues of ornamental stones are in accordance with established norms for water absorption. However, the samples with residues of silica rocks had lower values of water absorption.

Keywords: abrasive slurry, dimension stone, ceramic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma simplificado da fabricação dos corpos de prova cerâmicos..	33
Figura 2 - Distribuição granulométrica dos resíduos de rochas ornamentais	37
Figura 3 - Composição química média (a) da argila, (b) dos resíduos silicáticos e (c) dos resíduos carbonáticos estudados neste trabalho.	39
Figura 4 - Difratoograma dos resíduos silicáticos pertencentes ao Grupo 1.....	41
Figura 5 - Difratoograma dos resíduos silicáticos pertencentes ao Grupo 2.....	42
Figura 6 - Difratoograma dos resíduos silicáticos pertencentes ao Grupo 3.....	42
Figura 7 - Difratoograma dos resíduos silicáticos pertencentes ao Grupo 4.....	42
Figura 8 - Difratoograma dos resíduos silicáticos pertencentes ao Grupo 5.....	43
Figura 9 - Difratoograma dos resíduos carbonáticos pertencentes ao Grupo 6.....	43
Figura 10 - Propriedades físicas dos corpos de prova cerâmicos.....	45
Figura 11 - Absorção de água pelos corpos de prova cerâmicos	47
Figura 12 - Propriedades físicas dos corpos de prova por grupos mineralógicos.....	50
Figura 13 - Absorção de água pelos corpos de prova por grupos mineralógicos	50
Figura 14 - Corpos de prova cerâmicos (a) peças e microscopia digital em (b) 50x e (c) 100x com (1) a adição de resíduo silicático RS-19, (2) resíduo carbonático RC-01 e (3) sem adição de resíduo.....	51
Figura 15 - Microscopia óptica em 700x dos corpos de prova cerâmicos (a) com adição de resíduo silicático RS-19, (b) resíduo carbonático RC-01 e (c) sem adição de resíduo.....	53
Figura 16 - Microscopia óptica em 200x das peças cerâmicas incorporadas com (a) resíduo RS-19 e (b) resíduo RS-06.....	54

LISTAS DE SIGLAS

AA	Absorção de água
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
ABRIROCHAS	Associação Brasileira de Rochas Ornamentais
CDU	Ciclos de umidade
CL	Catodoluminescência
DA	Densidade Aparente
DP	Deformação piropástica
DRX	Difração de raios X
DV	Dureza Vickers
EDS	Espectroscopia de raios X por dispersão de energia
f_b	Resistencia à compressão individual
FRX	Fluorescência de raios X
LC	Lixiviação contínua
MEA	Massa específica aparente
MER	Massa específica real
MLT	Microscopia de luz transmitida
MO	Microscopia óptica
m_s	Massa seca
m_u	Massa úmida
P	Porosidade
PF	Perda ao fogo
RL	Retração linear
RV	Retração volumétrica
RC	Resíduo de rocha ornamental carbonática
RS	Resíduo de rocha ornamental silicática
TRF	Tensão de ruptura à flexão
ρ Rel.	Densidade relativa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1. Geração de resíduos finos de beneficiamento de rochas ornamentais	17
3.2. Classificação das rochas ornamentais	18
3.3. A cerâmica	19
3.4. Matérias-primas cerâmicas	21
3.4.1. <i>Argila</i>	21
3.4.2. <i>Calcita</i>	22
3.4.3. <i>Dolomita</i>	22
3.4.4. <i>Feldspato</i>	22
3.4.5. <i>Fundentes</i>	23
3.5. Utilização de resíduos finos de rochas ornamentais em cerâmica vermelha	23
3.5.1. <i>Uso de resíduos de rochas silicáticas</i>	24
3.5.2. <i>Uso de resíduos de rochas carbonáticas e misturas</i>	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. Coleta de amostras	31
4.2. Caracterização dos resíduos	32
4.3. Fabricação dos corpos de prova	32
4.4. Ensaio Físicos	33
4.4.1. <i>Retração Volumétrica</i>	33
4.4.2. <i>Massa específica real</i>	34
4.4.3. <i>Massa específica aparente</i>	34
4.4.4. <i>Densidade relativa</i>	34
4.4.5. <i>Absorção de água</i>	35
4.5. Análise microestrutural	36
4.6. Tratamento estatístico dos dados	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1. Caracterização dos resíduos	37
5.1.1. <i>Granulometria dos resíduos</i>	37
5.1.2. <i>Composição química dos resíduos</i>	37
5.1.3. <i>Mineralogia dos resíduos</i>	39
5.2. Correlação da composição química	43

5.3. Propriedades físicas das peças cerâmicas	45
5.4. Influência da composição química dos resíduos nas propriedades cerâmicas.....	48
5.4.1. <i>Influência da composição dos resíduos de rochas ornamentais silicáticas nas propriedades cerâmicas</i>	49
5.5. Influência da composição mineralógica dos resíduos nas propriedades cerâmicas.....	50
5.6. Microscopia digital.....	51
6. CONCLUSÕES	55
7. REFERÊNCIAS.....	56
APÊNDICES.....	61
ANEXO.....	66

1. INTRODUÇÃO

A exportação de rochas ornamentais é um importante setor da economia brasileira. Do mês de janeiro até o mês de outubro de 2017, o setor de rochas ornamentais arrecadou cerca de 766 milhões de dólares em exportações (ABIROCHAS, 2018). Entretanto, junto aos benefícios advindos do crescimento econômico, decorre o aumento na geração de resíduos indesejáveis que têm sido apontados como um importante ônus para as empresas de beneficiamento. O descarte dos resíduos industriais é um problema mundial, principalmente no caso da mineração, considerada um dos setores industriais que mais geram resíduos. Inserido neste, está o setor de produção de rochas ornamentais, que contribui com uma grande quantidade de resíduos sólidos em consequência das baixas taxas de aproveitamento da produção (VIDAL et al., 2014).

Segundo Fernandes et al. (2011), um dos grandes desafios atuais da mineração é a sustentabilidade. Pois, sem ecossistemas íntegros, raramente se pode pensar em desenvolvimento sustentável, e muitos dos depósitos sequer estão de acordo com a Legislação Ambiental, trazendo danos para as gerações atuais e futuras. Aguiar et al. (2016), advertiram em sua pesquisa que a disposição inadequada dos resíduos do polimento de rochas ornamentais contribuem para a poluição do solo e da água e traz grandes danos à vida aquática, pois esses resíduos apresentaram potencial mutagênico.

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos brasileira (Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010) a forma permitida para destinação final dos rejeitos é em aterros sanitários, que são locais protegidos do ar e do solo, com tratamento dos gases e componentes oriundos do aterro. Ainda segundo a Lei 12.305/10, o artigo 9º informa que “na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.” Portanto, encontrar um uso adequado e reciclar o resíduo deve ser prioridade à disposição final do mesmo (BRASIL, 2010).

Ademais de aliviar as preocupações com o descarte, a utilização dos rejeitos em cerâmica vermelha é capaz de poupar energia, pois é possível utilizar temperaturas mais baixas no processo de queima e produzir peças cerâmicas com melhores propriedades, além de poupar também gastos com matéria-prima (ACCHAR et al., 2006).

É grande a variabilidade dos tipos de rocha utilizados para fins ornamentais, sendo que cada tipo litológico possui composição mineralógica específica e, portanto química distinta. Vários trabalhos já foram conduzidos comprovando a possibilidade de utilização de resíduos de rochas ornamentais em cerâmica vermelha (ACCHAR et al., 2006; ELICHE-QUESADA et al., 2012; MOREIRA et al., 2008; RODRIGUES et al., 2012; SABOYA JR. et al., 2007; TAGUCHI et al., 2014; SULTANA et al., 2015), mas a influência da variedade composicional dos resíduos nas propriedades do produto final ainda não foi investigada. Tal variabilidade é ditada pelo tipo de rocha processada, já que o resíduo é composto, em grande parte, pelo pó da própria rocha que é desgastada durante a serragem de blocos.

O presente trabalho vem contribuir com essa discussão por meio da análise de 33 resíduos provenientes do beneficiamento de diferentes tipos de rochas ornamentais, 31 de composição silicática, beneficiamento mais comum no estado, e 2 de composição carbonática.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi verificar a influência da variabilidade composicional dos resíduos finos produzidos durante o beneficiamento de rochas ornamentais em propriedades de cerâmica vermelha.

Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais por meio das técnicas de análises granulométrica, fluorescência de raios X e difração de raios X;
- Comparar as características químicas, mineralógicas e composicionais dos resíduos caracterizados;
- Fabricar os corpos de prova cerâmicos contendo 20% de resíduo;
- Realizar testes físicos de retração volumétrica, massa específica real e aparente, densidade relativa e absorção de água;
- Realizar teste microestrutural com a utilização microscópio óptico digital.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Geração de resíduos finos de beneficiamento de rochas ornamentais

O Brasil é um dos maiores produtores de rochas ornamentais do mundo. Os últimos 30 anos do setor distinguiram-se como um período de progresso acelerado da produção brasileira, sendo superado apenas pela China, Índia e Turquia. O Brasil exportou rochas ornamentais para 120 países em 2016, com maior destaque para os EUA, gerando um saldo positivo no balanço de exportação e importação de rochas de mais de um bilhão de dólares (ABIROCHAS, 2016). Nesse cenário, o estado do Espírito Santo responde por 50% da produção nacional, por 75% do volume físico e 81% do total do faturamento das exportações brasileiras de rochas (ABIROCHAS, 2016; MONTANI, 2015).

As rochas ornamentais inicialmente foram utilizadas na arquitetura e na construção como elemento estrutural e desde que se desenvolveram técnicas de beneficiamento para o acabamento das peças, as mesmas atingiram grande uso como elemento de revestimento em pisos, paredes e fachadas. A utilização das rochas ornamentais é consideravelmente ampla, graças às suas características de beleza, funcionalidade, facilidade de aplicação, durabilidade e pela infinidade de usos que se pode obter com a exploração e a combinação de suas qualidades estruturais e estéticas (ALENCAR, 2013).

A produção de rochas ornamentais envolve os processos de extração e beneficiamento. A extração consiste na remoção do material útil ou economicamente aproveitável, em que o produto é um bloco de dimensões variadas que precisam obedecer ou aproximar-se das dimensões que proporcionem o melhor aproveitamento e utilização do material. O beneficiamento é a etapa seguinte, dividido em primário e final, com o objetivo de transformar os blocos em produtos finais ou quase acabados para posterior aplicação e uso (ALENCAR, 2013; VIDAL et al., 2014).

No beneficiamento primário ou desdobramento, os blocos são preparados e serrados em tiras, chapas ou espessores, com a ajuda de equipamentos tais como teares multilâminas (também denominados de convencionais), que utilizam lâminas de aço, ou teares multifios, talha-blocos ou teares de fios diamantados. Segundo Vidal et al. (2014), a tecnologia de corte com fio diamantado está substituindo

gradativamente as outras, sendo estimado que em 2020 um terço dos teares convencionais do parque industrial brasileiro terão sido substituídos por teares multifio. O tear multifio, além de processar o corte mais rapidamente, gera um resíduo mais limpo, facilitando seu posterior uso. Enquanto o resíduo produzido no multifio é constituído apenas de pó de rocha, água e constituintes do fio, o tear convencional além desses insumos e de ser mais lento, produz resíduos com a presença de gralha de aço, cal ou bentonita.

Os processos do beneficiamento secundário ou final são de grande diversidade e variada complexidade, envolvendo o polimento ou outro tipo de acabamento, o corte e o acabamento final. Dentre esses, o processo de polimento de chapas configura-se como a etapa mais importante, caracterizada por várias operações que reduzem a rugosidade da superfície a fim de transformá-la em uma placa com brilho. Outras formas de acabamento superficial também podem ser realizadas no material, como a flamagem, apicoamento, escovação, entre outras. Os produtos finais gerados são ladrilhos e painéis para revestimento de pisos e paredes internas e externas, soleiras, rodapés, bancadas de pias, colunas, mesas etc. (ALENCAR, 2013; VIDAL et al., 2014).

Durante os processos de produção, muito material é perdido. Vidal et al., (2014) estimam que nas serrarias 40% do volume do bloco processado se transforma em resíduo, dos quais 14% corresponde ao resíduo grosso (casqueiros) e 26% ao resíduo fino, chegando a um valor de 1.500.000 toneladas de resíduos finos gerados anualmente no Brasil.

3.2. Classificação das rochas ornamentais

A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, nos termos da norma NBR 15012 (ABNT, 2003), define rocha ornamental como “material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizado para exercer uma função estética” e foi definida também de maneira mais ampla por Vidal et al., (2014) como “material rochoso extraído e beneficiado, em maior ou menor grau, para ser utilizado em fins decorativos, de revestimento e estruturais”.

Existe uma discrepância quanto à nomenclatura comercial das rochas ornamentais e a nomenclatura geológica, que considera essencialmente a composição mineralógica e a textura das rochas.

As rochas magmáticas, também conhecidas como ígneas, são formadas pelo resfriamento e solidificação do magma pastoso que existe no interior da Terra e é expelido em erupções vulcânicas, o que pode ocorrer na superfície ou em grandes profundidades da crosta terrestre. Alguns exemplos de rochas magmáticas são os granitos, o basalto e o diorito. Diferente das rochas ígneas, as sedimentares resultam da deposição de detritos de outras rochas ou de materiais orgânicos em depressões do relevo terrestre devido à ação das chuvas, ventos, rios, mares e geleiras, desgastando as rochas da superfície. Podem ser citados como rochas sedimentares: os arenitos, conglomerados e argilitos. As rochas metamórficas têm sua origem na transformação de outras rochas (magmaicas, sedimentares ou de outras metamórficas), que, submetidas a mudanças nas condições de temperatura e pressão no interior da Terra, adquirem novas características e composição; são exemplos os mármore, os gnaisses e os quartzitos (LABTEC, 2018).

A despeito da grande variabilidade composicional das rochas, a nomenclatura comercial do setor de rochas ornamentais considera, de forma geral, dois grupos principais: os mármore e os granitos. Mármore são rochas de composição carbonática, possuindo baixa dureza o que facilita o corte e o polimento, porém por consequência possuem certa vulnerabilidade ao desgaste. Os granitos comerciais são as rochas de composição silicática, envolvendo rochas ígneas e metamórficas compostas principalmente por quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio; possuem alta dureza e, portanto, são rochas ornamentais de alta qualidade devido à grande resistência mecânica (VIDAL et al., 2014).

3.3. A cerâmica

A cerâmica é o material artificial mais antigo produzido pelo homem. O nome vem do grego "kéramos", que significa "terra queimada" ou "argila queimada", isto é, um artefato produzido a partir da argila. A argila é umedecida, o que a torna muito plástica e fácil de moldar, em seguida, é submetida à secagem para retirar a maior parte da água e sinterizada a altas temperaturas, por volta de 1000 °C, que lhe atribui rigidez e resistência mediante a fusão de certos componentes da massa e, em alguns casos, fixando os esmaltes na superfície (ANFACER, 2018).

Segundo a ABCERAM (2018), cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos,

não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas. São subdivididas segundo o mesmo autor em cerâmica vermelha, branca, de alta tecnologia ou avançada, de revestimento, refratárias, de isolamento térmico, de fritas e corantes, abrasivas, vidro, cimento e cal; essas três últimas consideradas muitas vezes à parte da cerâmica, por suas particularidades.

A cerâmica vermelha engloba aqueles materiais com coloração avermelhada que são empregados na construção civil, como tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos, argilas expandidas e também utensílios de uso doméstico e de adorno. As lajotas muitas vezes são consideradas cerâmica vermelha, porém, segundo a ABCERAM, o mais correto é classificá-las em materiais de revestimento, que são materiais na forma de placas usados na construção civil para revestimento de paredes, pisos, bancadas e piscinas de ambientes internos e externos, tais como os azulejos, pastilhas, porcelanatos, grês e pisos (ABCERAM, 2018).

A dosagem das matérias-primas e dos aditivos é uma das etapas fundamentais do processo de fabricação de produtos cerâmicos. Dentre as diversas substâncias minerais consumidas, destacam-se, em razão do volume de produção atingido, as argilas de queima vermelha ou argilas comuns que respondem pelo maior consumo. Porém, os materiais cerâmicos geralmente são fabricados a partir da composição de duas ou mais matérias-primas, além de aditivos e água. No caso da cerâmica vermelha, utiliza-se apenas argila como matéria-prima, mas raramente emprega-se apenas um único tipo, geralmente entram na sua composição duas ou mais argilas com características diferentes (FEAM, FIEMG, 2013; ABCERAM, 2018).

Busca-se por meio da composição dessa mistura, uma massa que tenha algumas funções tecnológicas essenciais, tais como, plasticidade, para propiciar a moldagem das peças; resistência mecânica à massa verde e crua, conferindo coesão e solidez às peças moldadas, permitindo assim, a sua trabalhabilidade na fase pré-queima; fusibilidade, para favorecer a sinterização e, conseqüentemente, a resistência mecânica e a diminuição da porosidade; drenagem, para facilitar a retirada de água e a passagem de gases durante a secagem e queima, evitando trincas e dando rapidez ao processo; coloração das peças, atribuindo cores às cerâmicas por meio da presença de corantes naturais (óxidos de ferro e manganês) (LUZ; LINS, 2008).

Para cada tipo de produto cerâmico, existe uma norma específica que rege sua fabricação. A NBR 15270-1 (ABNT, 2005a) define bloco cerâmico de vedação como

“componente da alvenaria de vedação que possui furos prismáticos perpendiculares às faces que os contêm” e a NBR 15270-2 (ABNT, 2005b) define bloco cerâmico estrutural como “componente da alvenaria estrutural que possui furos prismáticos perpendiculares às faces que os contêm”, esses devem estar de acordo com as características físicas de massa seca (m_s) e de absorção de água (AA), com características mecânicas de resistência à compressão individual (f_b) e com características visuais e geométricas estabelecidas nos ensaios da NBR 15270-3 (ABNT, 2005c).

Outra norma importante para a fabricação de cerâmica vermelha é a NBR 7170 (ABNT, 1983b) que define tijolos maciços como “tijolo que possui todas as faces plenas de material, podendo apresentar rebaixos de fabricação em uma das faces de maior área”. Esses precisam obedecer às características visuais estabelecidas pela mesma norma, às características geométricas, estabelecidas pela norma NBR 8041 (ABNT, 1983c), e às características mecânicas de resistência à compressão, estabelecidas segundo a norma NBR 6460 (ABNT, 1983a).

A NBR 15310 (ABNT, 2005d) define as telhas cerâmicas como “componentes destinados à montagem de cobertura estanque à água, de aplicação descontínua”. Elas devem possuir requisitos específicos de massa, tolerância dimensional, absorção de água, impermeabilidade e carga de ruptura à flexão em três pontos.

Além da responsabilidade do cumprimento das normas técnicas, o setor de cerâmica vermelha no Brasil enfrenta outros grandes desafios, dentre eles a manutenção do suprimento de argilas, compatibilizando a atividade extrativa com outras vocações econômicas do território e com a preservação ambiental, de forma a garantir para as próximas décadas o suprimento de matérias-primas para as indústrias de cerâmica vermelha (FEAM, FIEMG; 2013). Esse problema pode ser mitigado com o aproveitamento dos resíduos sólidos de outras indústrias na massa cerâmica, reduzindo assim o custo e a quantidade de matéria-prima utilizada, evitando que esses resíduos sejam descartados como rejeitos em depósitos que frequentemente não estão de acordo com as leis ambientais vigentes.

3.4. Matérias-primas cerâmicas

3.4.1. Argila

Argila é um material natural, de textura terrosa, de granulação fina, constituída essencialmente de argilominerais, podendo conter outros minerais que não são argilominerais (quartzo, mica, pirita, hematita, entre outros.), matéria orgânica e outras impurezas. Os argilominerais são os minerais característicos das argilas que lhe conferem propriedades tais como: plasticidade, resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação etc. As argilas, mais adequadas à fabricação dos produtos de cerâmica vermelha, apresentam em sua constituição os argilominerais ilita, de camadas mistas ilita-montmorilonita e clorita-montmorilonita, além de caulinita, pequenos teores de montmorilonita e compostos de ferro (ABCERAM, 2018).

3.4.2. *Calcita*

A calcita é um carbonato de cálcio (CaCO_3), correspondendo a um teor teórico mássico de 54,5% de CaO e 45,5% de CO_2 . Em massas calcárias, com teores de até 30%, esse mineral proporciona aos corpos cerâmicos elevada porosidade e, portanto, baixa resistência mecânica, porém faz com que tais corpos apresentem baixa contração linear na queima. Quando em pequenas quantidades, até 3%, age como fundente auxiliar e minimiza o problema de trincas (ABCERAM, 2018).

3.4.3. *Dolomita*

A dolomita é um carbonato duplo de cálcio e magnésio, ($\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3$), correspondendo a um teor mássico teórico de cerca de 54,5% de carbonato de cálcio e 45,5% de carbonato de magnésio e possui comportamento semelhante ao da calcita (ABCERAM, 2018).

3.4.4. *Feldspato*

O termo feldspato cobre uma série de alumino-silicatos alcalinos ou alcalinos terrosos. Para a indústria cerâmica os feldspatos de maior importância são o potássico ($\text{K}_2\text{O}.\text{Al}_2\text{O}_3.6\text{SiO}_2$), como o microclínio, e o sódico ($\text{Na}_2\text{O}.\text{Al}_2\text{O}_3.6\text{SiO}_2$),

como a abita, por terem temperatura de fusão relativamente baixa, sendo assim, empregados como geradores de “massa vítrea” nas massas cerâmicas e nos vidrados (ABCERAM, 2018).

3.4.5. *Fundentes*

Fundentes são materiais com elevado teor de álcalis (K_2O e Na_2O) que, quando presentes em uma composição cerâmica, reduzem a temperatura de queima e a porosidade do produto. Essas duas condições são importantes para produtos como os de cerâmica vermelha, cerâmica branca e materiais de revestimento (placas cerâmicas), uma vez que além de baixar o custo, reduzem a capacidade de absorção de água desses materiais e aumentam sua resistência mecânica (ABCERAM, 2018).

3.5. Utilização de resíduos finos de rochas ornamentais em cerâmica vermelha

A utilização dos resíduos ainda é modesta, se comparada às quantidades geradas. Porém, diversas pesquisas (ACCHAR et al., 2006; ELICHE-QUESADA et al., 2012; MOREIRA et al., 2008; RODRIGUES et al., 2012; SABOYA JR et al., 2007; TAGUCHI et al., 2014; SULTANA et al., 2015) demonstram a praticabilidade técnica da utilização dos resíduos de rochas ornamentais em vários setores industriais, como o setor de construção civil e o de agricultura (VIDAL et al., 2014).

Boltakova et al. (2016) constataram que a queima de cerâmica de alta temperatura 900-1100 °C permite neutralizar e armazenar de forma segura muitos tipos de resíduos e que estes resíduos para as matérias-primas de argila tornam possível aumentar a qualidade do produto.

A aplicação do resíduo de rocha ornamental em cerâmica vem sendo estudada ao longo dos anos pelos autores citados acima. Esses concluíram que, além de ser uma ótima opção para minimizar a quantidade de rejeito no meio ambiente, o resíduo pode melhorar algumas propriedades físicas, como a absorção de água, e propriedades mecânicas da cerâmica, como a resistência mecânica.

3.5.1. *Uso de resíduos de rochas silicáticas*

Para o setor de rochas ornamentais, as rochas denominadas como granitos nem sempre correspondem a esse tipo petrográfico. Muitas vezes, essas rochas apresentam elementos texturais muito discrepantes, que englobam rochas de composição silicáticas, compostas principalmente por quartzo, feldspatos potássicos e micas. Minerais como plagioclásio e microlina também são encontrados na composição (LABTEC, 2018).

O Quadro 1 apresenta uma relação dos autores que testaram o uso de resíduos de rochas ornamentais de composição silicática na fabricação de cerâmica vermelha, com a origem do material, as porcentagens máximas agregadas à massa e os ensaios realizados para comprovar a adequabilidade do produto.

Segundo Menezes et al. (2002), os resultados obtidos nos ensaios de módulo de ruptura à flexão (TRF), resistência à compressão (f_b) e absorção de água (AA) confirmam a possibilidade de utilização de até 50% de resíduo em peso na massa cerâmica, dependendo da temperatura de queima. Os resíduos utilizados são provenientes da serragem de granitos de três indústrias de beneficiamento de rochas ornamentais da região nordeste. Os resíduos foram utilizados como parte da matéria-prima na produção de blocos e revestimentos cerâmicos, pois os mesmos apresentam massas específicas reais, distribuição granulométrica e áreas específicas semelhantes às das matérias-primas cerâmicas tradicionais.

Moreira et al. (2003) também concluíram que é possível a utilização dos resíduos como matéria-prima na fabricação de cerâmica vermelha para a construção civil, entretanto, ressaltaram que a resistência mecânica do material com a incorporação do resíduo foi fortemente afetada, sendo aconselhável, evitar o uso de quantidades excessivas. Esses autores utilizaram até 10% de resíduos na preparação dos corpos cerâmicos e realizaram outros ensaios cerâmicos, como o de retração linear (RL), a difração de raios X (DRX) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV).

O mesmo foi observado por Vieira et al. (2004), além de observarem melhoras no processo de extrusão e na plasticidade, facilitando a fase de secagem e diminuindo os defeitos e a porosidade da argila cozida.

Quadro 1 – Trabalhos que utilizaram resíduos de rochas silicáticas em cerâmica vermelha.

Autores	Fonte dos resíduos	Quantidade utilizada	Tipo de aplicação	Ensaio cerâmicos realizados
Menezes, Ferreira, Neves, Ferreira (2002)	Corte	Até 60 %	Tijolos e blocos cerâmicos	TRF, f_b , AA
Moreira, Freire, Holanda (2003)	Corte	Até 10%	Tijolos, telhas e blocos cerâmicos	RL, AA, TRF, DRX, MEV
Monteiro, Peçanha, Vieira (2004)	Corte	Até 40%	Telhas	DA, RL, AA, TRF, DRX
Vieira, Soares, Sánchez, Monteiro (2004)	Corte	Até 40%	Cerâmica vermelha	DA, RL, AA, TRF, MEV, P, DRX
Moreira, Manhães, Holanda (2005)	-	Até 20%	Tijolos, telhas e blocos cerâmicos	RL, AA, MEA, TRF, DRX
Menezes, Ferreira, Neves, Lira, Ferreira (2005)	Corte	Até 38%	Telhas e blocos cerâmicos	AA, TRF, f_b
Vieira, Monteiro, Barreto, Carvalho (2006)	Corte	10%	Telhas	P, RL, AA, TRF
Acchar, Vieira, Segadães (2006)	Corte	30%	Cerâmica vermelha	P, TRF, MEV, RL
Menezes, Almeida, Santana, Neves, Lira, Ferreira (2007)	-	Até 50%	Telhas e blocos cerâmicos	AA, TRF
Vieira, Monteiro, Barreto, Carvalho, Peiter (2008)	Corte	-	Telhas	P, RL, AA, TRF
Moreira, Manhães, Holanda (2008)	Corte	Até 20%	Tijolos maciços, blocos e telhas	AA, RL, DA, TRF
Torres, Fernandes, Olhero, Ferreira (2009)	Corte e polimento	10%	Telhas	TRF, AA, RL, DP, MEV, EDS
Manhães, Moreira, Holanda (2009)	-	Até 20%	Cerâmica vermelha	DRX, MEV, MO, P, TRF, DV
Xavier, Saboya, Maia, Alexandre (2009)	Corte	Até 10%	Cerâmica vermelha	LC, CDU, AA, TRF, MEV
Vieira, Emiliano (2013)	-	Até 50%	Telhas	DA, AA, RL, TRF
Vieira, Pinheiro (2013)	-	Até 50%	Telhas	MO, MEV DRX
Taguchi, Santos, Gomes, Cunha (2014)	Corte	Até 60%	Tijolos maciços, blocos e telhas	DA, AA, RL, TRF
Soltan, Pöhler, Fuchs, El-Raouf, El-Kaliouby, Koenig, Pöllmann (2016)	Corte	33%	Cerâmica vermelha	RL, DA, P, AA, f_b , MLT, CL, MEV

Legenda: AA – absorção de água, CDU – ciclos de umidade, CL – catodoluminescência, DA – densidade aparente, DP – deformação pirolástica, DRX – difração de raios X, DV – dureza Vickers, EDS – espectroscopia de raios X por dispersão de energia, f_b – resistência à compressão individual, LC – lixiviação contínua, MEA – massa específica aparente, MEV – microscopia eletrônica de varredura, MLT – microscopia de luz transmitida, MO – microscopia óptica, P – porosidade, RL – retração linear, TRF – tensão de ruptura à flexão.

Moreira, Manhães e Holanda (2005; 2008) utilizaram até 20% em peso de resíduos na massa de tijolos maciços, blocos cerâmicos e telhas. Os autores confirmaram resultados favoráveis para retração linear, absorção de água e resistência mecânica nos corpos cerâmicos com a incorporação do resíduo e que essa incorporação não modifica o processo de produção de cerâmica vermelha.

Menezes et al. (2005) observaram que a adição de resíduos em composições cerâmicas para produção de tijolos em até 35% em peso causou um ligeiro aumento na absorção de água, porém também provocou um aumento no módulo de ruptura. Os mesmos autores concluíram que composições cerâmicas com adição de até 38% em peso de resíduos podem ser usadas para produzir telhas e azulejos. Com queima a 1200 °C, eles podem ser usados para produzir cerâmicas com absorção de água inferior a 3%.

Achar, Vieira e Segadães (2006) utilizaram resíduos de granito e concluíram que a adição desses controlam a plasticidade e a retração da argila, podendo ser usado para substituir os fluxantes tradicionais. Assim, o uso de quantidades significativas de rejeitos de granito é bastante promissor e tem o potencial de melhorar e minimizar o impacto negativo da lama de corte no ambiente.

Menezes et al. (2007), além de resíduos de granito, testaram também resíduos de caulim na composição da massa cerâmica. Os autores observaram uma diminuição dos valores de absorção de água e o aumento do módulo de ruptura a flexão com a adição do resíduo de granito em comparação às cerâmicas com a incorporação apenas de resíduo de caulim. A utilização conjunta dos dois resíduos possibilitou diminuir a temperatura da queima de 1000 °C para 800 °C para os mesmos valores de módulo de ruptura.

Taguchi et al. (2014) avaliaram as propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado em até 60% de incorporação em peso. Os autores afirmam que esse tipo de resíduo pode ser utilizado na fabricação de peças cerâmicas, pois essas formulações obtiveram propriedades tecnológicas superiores ao indicado pelas normas técnicas que regem essa classe de produtos.

Monteiro et al. (2004) estudaram a incorporação de resíduos de rochas ornamentais especificamente em telhas e confirmaram a melhora nos valores de absorção de água e de resistência mecânica com a incorporação de até 40% em peso do resíduo. Vieira et al. (2006) substituíram a areia das massas cerâmicas para

fabricação de telhas por 10% de resíduo de gnaiss em peso e observaram que não ocorreu modificação significativa na plasticidade, porém houve uma drástica redução da absorção de água e aumento da retração linear. Os autores afirmam que o efeito benéfico do aumento significativo da resistência mecânica é a principal justificativa para a utilização dos resíduos de rocha ornamental em telhas.

Vieira et al. (2008) fizeram testes industriais substituindo a areia de quartzo por finos de gnaiss em massa cerâmica para telhas e descobriram que absorção de água das massas diminuiu com a adição do resíduo, no entanto ainda estava acima do permitido pela NBR 15310 (ABNT, 2005d) e que, portanto, a massa industrial padrão composta por 70% de argila amarela, 20% de argila preta e 10% de areia necessitava de reformulação. Em contrapartida, a carga de tensão à ruptura estava dentro da norma estabelecida, porém estatisticamente não houve acréscimo com a adição do resíduo, demonstrando que os finos de gnaiss não atuaram efetivamente como fundentes e sim como material de preenchimento.

Ainda para a produção de telhas, Torres et al. (2009) incorporam, além do resíduo do corte, o resíduo do polimento de rochas silicáticas, que é um resíduo com mais insumos. Os autores chegaram à conclusão de que a inserção de 10% em peso de resíduos produziu uma nova formulação mecanicamente mais forte, menos porosa e mais resistente à deformação em comparação à massa industrial de referência.

Vieira e Emiliano (2013) investigaram os efeitos da incorporação de pó de um tipo diferente de rocha, o argilito, uma rocha sedimentar, nas propriedades físicas e mecânicas de telhas. Eles chegaram à conclusão de que a substituição de 30% de argilito no lugar da argila pode ser economicamente viável, pois melhorou significativamente a trabalhabilidade e as propriedades tecnológicas da queima, por meio da redução da porosidade e, portanto, da absorção de água. Houve também incremento da resistência mecânica em comparação com a típica massa cerâmica industrial. Vieira e Pinheiro (2013) estudaram a avaliação microestrutural dessa mesma incorporação e observaram melhorias significativas na microestrutura da cerâmica argilosa, como a diminuição da porosidade e como consequência a diminuição da absorção de água, observando também que o argilito proporcionou um aumento da hematita nas fases de queima, podendo ter contribuído para a melhora da resistência mecânica.

Manhães et al. (2009) estudaram a variação microestrutural da cerâmica vermelha incorporada com resíduo de gnaiss e observaram que durante o processo de

queima ocorre uma grande variação; sendo que a adição do resíduo contribuiu para a diminuição da porosidade aparente e aumento da dureza das peças cerâmicas. A massa cerâmica com 20% de resíduo, queimada a 1150 °C apresentou uma estrutura mais densificada e suave com menos defeitos que a massa isenta de resíduo. Os mesmos autores observaram também que a temperatura de queima contribui para a densificação das peças, enquanto o efeito principal dos resíduos foi oferecer óxidos alcalinos à massa, contribuindo para a formação da fase líquida e concomitantemente ajudando na vitrificação.

O processo de degradação de peças cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito foi estudado por Xavier et al. (2009). Eles notaram que, para uma temperatura de queima de até 700 °C, a inserção dos resíduos aumentou a resistência à degradação, melhorando as características de durabilidade. Todavia, o oposto é observado em temperaturas mais elevadas, a 900 °C, na qual a inclusão dos resíduos resultou em perdas de resistência à degradação.

Para a fabricação de tijolos de barro, Soltan et al. (2016) utilizaram rejeitos de rochas de granito e caulinita e as características físicas do lote cozido, a 1200 °C, mostraram que ele pode ser usado para esse fim.

Em resumo, os resultados dos trabalhos ora citados, que utilizaram resíduos de rochas ornamentais em cerâmica vermelha comprovam que esses resíduos quando adicionados à massas cerâmicas tradicionais melhoram as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais e apontam para uma economia de energia no processo de produção, bem como economia de matérias-primas.

3.5.2. Uso de resíduos de rochas carbonáticas e misturas

Comercialmente, rochas carbonáticas como calcários e mármore são denominados como mármore. Os mármore, em função do grau metamórfico, apresentam granulação variando de fina até média-grossa, enquanto os calcários, sem metamorfismo, caracterizam-se como rochas com granulometria muito fina. (LABTEC, 2017). O Quadro 2 lista os autores que utilizaram rochas carbonáticas e a mistura de silicáticas com carbonáticas na composição de massas cerâmicas.

Quadro 2 - Autores que utilizaram resíduos de rochas carbonáticas e misturas em cerâmica vermelha.

Autores	Fonte dos resíduos	Quantidade utilizada	Tipo de aplicação	Ensaio realizados
Silva, Hotza, Segadães, Acchar (2005)	-	Até 50%	Cerâmica	TRF, MEA, AA, DRX
Acchar, Vieira, Hotza (2006)	Corte	Até 50%	Cerâmica	DA, AA, TRF
Acchar, Vieira, Segadães (2006)	Corte	30%	Cerâmica vermelha	P, TRF, MEV, RL
Rodrigues, Xavier, Saboya Jr., Maia, Alexandre (2012)	Corte	Até 10%	Cerâmica vermelha	P, RL, AA, MEA, TRF
Saboya Jr, Xavier, Alexandre (2007)	Corte	Até 20%	Blocos cerâmicos	P, AA, RL, DRX, MEV

Legenda: AA – absorção de água, DA – densidade aparente, DRX – difração de raios X, MEA – massa específica aparente, MEV – microscopia eletrônica de varredura, P – porosidade, RL – retração linear, TRF – tensão de ruptura à flexão.

Silva et al. (2005) investigaram a incorporação de resíduos de mármore e granito em massas argilosas e observaram que nos corpos sinterizados em temperaturas de 950 °C a 1150 °C, as propriedades físicas e mecânicas foram melhores que as especificadas nas normas técnicas, mostrando que é possível a incorporação desses rejeitos na fabricação de cerâmica vermelha.

O mesmo resultado também foi encontrado por Acchar, Vieira e Hotza (2006), afirmando ainda que o rejeito atua como agente fluxante, reduzindo a temperatura de sinterização dos materiais argilosos, resultando, portanto em uma economia de energia e matéria-prima. Os autores ainda afirmam que a utilização de até 50% de resíduo não degrada as propriedades mecânicas do material.

Acchar, Vieira e Segadães (2006) mostraram que os rejeitos de mármore e granito podem ser usados para substituir os fluxantes tradicionais com o benefício adicional de controlar a plasticidade e a retração da argila. Além disso, verificaram também que essa mistura de rejeitos é particularmente adequada para um processo de fabrico em que as flutuações na temperatura de queima e na composição não implicam mudanças bruscas nas propriedades.

Rodrigues et al. (2012) chegaram às mesmas conclusões dos autores citados e aconselharam a incorporação de 10% de rejeito em cerâmica vermelha sinterizada a 900 °C por suas características de durabilidade e confiabilidade.

Saboya Jr. et al. (2007) utilizaram apenas pó de mármore para produzir blocos cerâmicos e estes autores concluíram que uma composição de matéria-prima de

15% de resíduo na massa, sinterizada a 850 °C, pode ser utilizada em escala industrial. Porém, se a indústria cerâmica possuir forno com capacidade para temperaturas acima de 950 °C, pode ser utilizado um maior teor de resíduos, sem perda de qualidade. Os autores afirmam ainda que a maior vantagem para usar esse tipo de resíduos é a baixa temperatura necessária para dissociar a calcita e a dolomita, melhorando a resistência do corpo cerâmico. Além disso, os mesmos ressaltam que o comportamento mecânico desse material deve ser determinado durante um longo período de tempo, a fim de avaliar a vida útil do tijolo cerâmico incorporado com resíduos.

Os trabalhos citados que utilizaram resíduos carbonáticas como matéria prima para massas cerâmicas também obtiveram melhoras nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais das cerâmicas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Coleta de amostras

As amostras foram coletadas em indústrias de beneficiamento de rochas ornamentais do município de Cachoeiro do Itapemirim, região sul do estado do Espírito Santo.

A coleta foi realizada anteriormente, pelo grupo de pesquisa no qual a autora está inserida, no escopo do projeto de pesquisa intitulado “Caracterização do Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais do Espírito Santo” conduzido junto ao Departamento de Geologia do CCENS/UFES.

Os resíduos foram coletados diretamente da saída de teares do tipo convencional (que utilizam lâminas de aço) e armazenados em frascos de polietileno de 2 L. No momento da coleta, anotou-se o tipo de rocha que estava sendo serrada. Tomou-se precauções para que o resíduo coletado fosse proveniente apenas de um bloco rochoso, isso é, que não houvesse misturas de resíduos provenientes de tipos diferentes de rocha. Foram coletados resíduos gerados por 33 tipos de rochas ornamentais, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Lista de amostras de resíduos coletados de acordo com o tipo de rocha processado.

Amostra	Sigla	Amostra	Sigla
Amarelo Icarai	RS-01	Marrom Bahia	RS-21
Amarelo Santa Cecília	RS-02	Marrom Tabaco	RS-22
Amarelo Ornamental	RS-03	Nero Marinace	RS-23
Amarelo Samoa	RS-05	Ocre Itabira	RS-24
Branco Dallas	RS-06	Ouro Brasil	RS-25
Blue Fire	RS-07	Preto Absoluto	RS-26
Branco Itaúnas	RS-09	Preto Aracruz	RS-27
Cinza Castelo	RS-11	Preto Indiano	RS-28
Cinza Corumbá	RS-12	Preto São Gabriel	RS-29
Crema Bordeaux	RS-13	Typhoom Bordeaux	RS-30
Crema Marfim	RS-14	Verde Peacock	RS-32
Delicatus	RS-15	Verde Pérola	RS-33
Dourado Carioca	RS-16	Vermelho Brasília	RS-35
Giallo Fiorito	RS-17	Versace	RS-36
Giallo Antico	RS-18	Mármore Aquarela	RC-01
Golden Flower	RS-19	Mármore Pinta Verde	RC-03
Golden Ray	RS-20		

Legenda: RS - Resíduos de rochas silicáticas e RC - Resíduos de rochas carbonáticas.

4.2. Caracterização dos resíduos

Em laboratório, os resíduos foram secos ao ar e desaglomerados para posterior análise granulométrica e mineralógica. A separação das frações granulométricas foi feita a úmido com abertura de 0,045 mm (325 *mesh*), 0,063 mm (230 *mesh*), 0,125 mm (120 *mesh*) e 0,25 mm (60 *mesh*).

A análise química foi determinada por análise semi-quantitativa em espectrômetro de fluorescência de raios X (*Axios Advanced PANalytical*) na Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus Rio Claro. A perda ao fogo foi determinada a 1050 °C por 1 hora em mufla.

A análise mineralógica dos materiais foi feita por difratometria de raios X (DRX) no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$) no intervalo angular 2θ de 0 a 70°, passo angular 0,05° e tempo de contagem de 1 segundo, a fim de identificar as fases cristalinas por meio dos arquivos JCPDS.

4.3. Fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fabricados no Laboratório de Engenharia Química da UFES – Campus Alegre, contendo 20% em peso de resíduo e 80% de argila. Essa porcentagem foi escolhida baseada nos trabalhos de Vieira et al. (2004), Menezes et al. (2005), Moreira et al. (2005, 2008) e Taguchi et al. (2014); que observaram a possibilidade de utilização de 20% de resíduo em cerâmica vermelha, sem comprometer as características exigidas pelas normas.

O material foi umidificado em 10% e conformado utilizando uma prensa hidráulica, de marca Vonder – VPH 15, em uma matriz cilíndrica de 37 mm de diâmetro. Posteriormente, os corpos de prova foram secos em estufa a 110 °C por 24 horas e sinterizados em um forno simulador de queima cerâmica, modelo ForteLab QR 1300/3, a 1000 °C, por uma hora, com rampa de 10 °C por minuto. Em seguida, foram resfriados naturalmente. Os corpos de prova foram feitos em triplicata e a escolha da temperatura de sinterização foi feita com base nas faixas de temperaturas utilizadas nos trabalhos citados acima. O fluxograma simplificado do processo de fabricação pode ser observado na Figura 1.

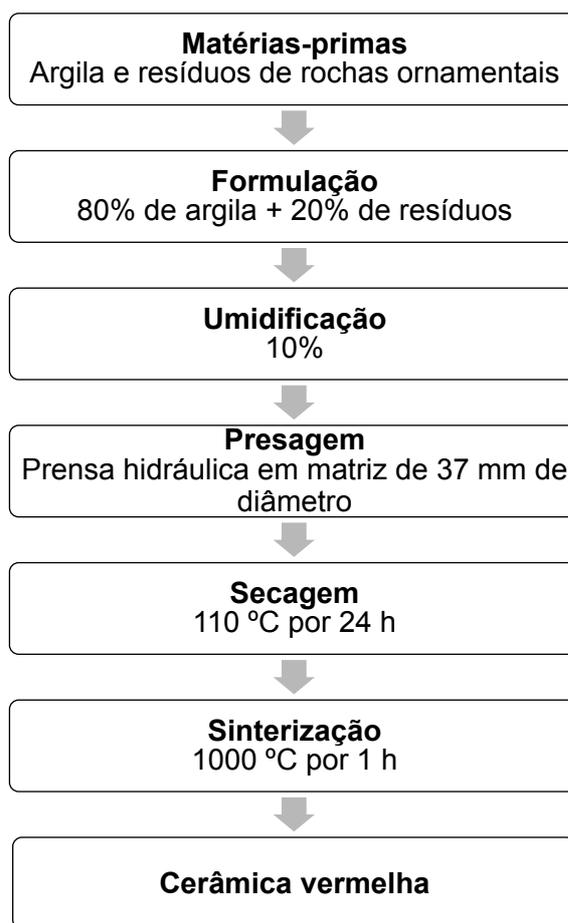


Figura 1 – Fluxograma simplificado da fabricação dos corpos de prova cerâmicos.

4.4. Ensaio Físicos

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios físicos a fim de verificar se a composição dos diferentes tipos de resíduos de rochas ornamentais, nas condições em que foram empregados, interfere nos parâmetros de qualidade da cerâmica vermelha. Foram medidas, nos corpos de prova, as propriedades descritas abaixo.

4.4.1. *Retração Volumétrica*

Foi determinada a retração volumétrica de queima (RV). Esse parâmetro foi obtido por meio da medida do volume dos corpos de prova cerâmicos antes e após a queima. A RV é dada pela Equação 1, na qual v_Q e v_s são esses volumes respectivamente.

$$RV (\%) = \left(\frac{V_s - V_Q}{V_s} \right) \times 100 \quad (1)$$

4.4.2. Massa específica real

A massa específica real (MER) foi determinada utilizando o método da picnometria do material não sinterizado. Primeiro foi medida a massa da mistura de argila e resíduo em balança analítica (ma), depois foi medida a massa do picnômetro com água (mp) e anotada a temperatura da água. Em seguida, a massa da mistura foi adicionada ao picnômetro com água e a massa do conjunto foi medida (mpa). A massa específica real foi determinada segundo a Equação 2, na qual $d_{\text{água}}$ é a densidade da água.

$$MER = \frac{ma}{mp - (mpa - ma)} \cdot d_{\text{água}} \quad (2)$$

4.4.3. Massa específica aparente

Para determinar a massa específica aparente (MEA) das placas cerâmicas sinterizadas, foi necessário medir a massa dos corpos de prova em balança de precisão e suas dimensões com o auxílio de um paquímetro. A massa específica aparente foi determinada por meio da Equação 3, na qual m é a massa da placa cerâmica e v o seu volume aparente.

$$MEA = \frac{m}{v} \quad (3)$$

4.4.4. Densidade relativa

A densidade relativa (ρ Rel.) das placas cerâmicas foi determinada pelo método geométrico. Esse método, consiste na divisão da massa específica aparente (MEA)

pela massa específica real (MER), de acordo com a Equação 4.

$$\rho_{Rel.} = \frac{MEA}{MER} \quad (4)$$

4.4.5. Absorção de água

Para o ensaio de absorção de água (AA), foram utilizadas as normas a NBR 15270-3 (ABNT, 2005c) e a NBR 15310 (ABNT, 2005d). Para tanto, foi necessário a determinação da massa seca e da massa úmida do material.

Para a determinação da massa seca, foram retirados pó e outras partículas soltas dos corpos de prova, os quais foram, então, submetidos à secagem em estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, pesando os mesmos individualmente logo após a remoção da estufa em intervalos de 1h, até que a pesagem de cada um dos corpos se mantenham em, no máximo, 0,25% de um intervalo para o outro. A massa dos corpos de prova após estabilização foi denominada massa seca (m_s).

A determinação da massa úmida (m_u) foi feita após a determinação da massa seca. Os corpos de prova foram colocados em um recipiente com água à temperatura ambiente, em volume suficiente para mantê-los totalmente imersos, e foi gradativamente aquecido até a água entrar em ebulição, e mantidos assim por 2 horas. Após esse tempo, a fervura foi interrompida e os corpos de prova foram resfriados via substituição lenta da água quente por água a temperatura ambiente e então foram removidos da água e colocados na bancada para o escoamento do excesso. A água remanescente ainda foi removida com o auxílio de um pano limpo e úmido, porém, o tempo decorrido entre a remoção do excesso de água não passou de 15 minutos. Logo em seguida, os corpos saturados foram pesados individualmente e o resultado é massa úmida da peça cerâmica. A absorção de água (AA), por fim, foi calculada pela Equação 5.

$$AA = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (5)$$

4.5. Análise microestrutural

A análise microestrutural óptica foi realizada em microscópio digital da marca Hirox, modelo KH-7700, com aumento de 50, 100, 250 e 700 vezes e realizada no Laboratório de Engenharia Química da UFES – Campus Alegre.

4.6. Tratamento estatístico dos dados

Para o tratamento estatísticos dos dados, foram realizadas análises de correlação utilizando o software Microsoft Excel e análises de representações gráficas em *box-plots* utilizando o software MATLAB R2014b.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização dos resíduos

5.1.1. Granulometria dos resíduos

A Figura 2 mostra a distribuição granulométrica de todas as amostras analisadas, indicando a quantidade, em porcentagem, de partículas passantes nas peneiras de 60 (0,25 mm), 120 (0,125 mm), 230 (0,063 mm) e 325 (0,045 mm) *mesh*.

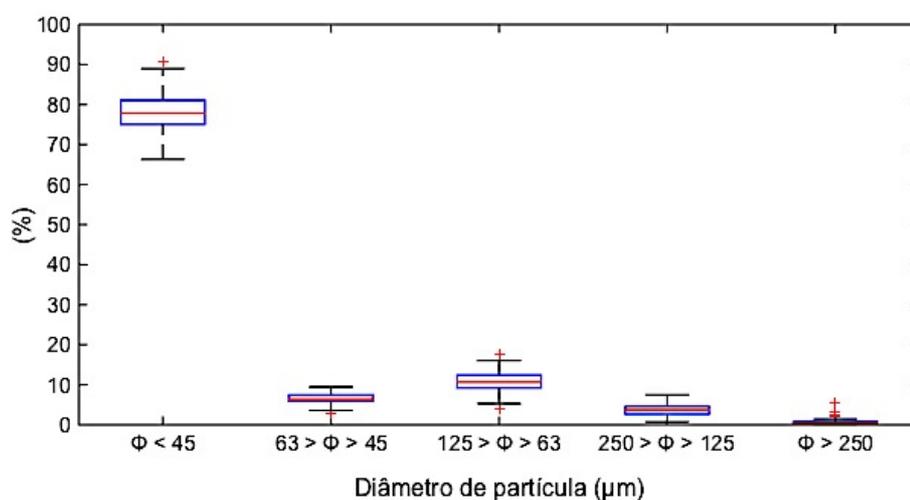


Figura 2 - Distribuição granulométrica dos resíduos de rochas ornamentais.

Os resíduos possuem granulação muito fina e uniforme, pois de 66,6 a 90,7% das partículas, incluindo resíduos oriundos de todos os tipos litológicos, possuem diâmetro menor do que 45 µm. Portanto, esses materiais não necessitam de redução do tamanho de partículas para agregação na massa cerâmica, o que representaria economia de energia para a indústria.

5.1.2. Composição química dos resíduos

Por meio das análises de fluorescência de raios X, observa-se, na Tabela 2, as distintas composições químicas, expressas em óxidos, dos resíduos de rochas ornamentais silicáticas (RS) e de rochas ornamentais carbonáticas (RC).

Tabela 2 – Composição química dos resíduos obtida pela técnica de FRX (dados em %)

Rochas Silicáticas											
Amostra	SiO₂	TiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MnO	MgO	CaO	Na₂O	K₂O	P₂O₅	PF
RS-01	66,28	0,14	10,61	12,76	0,13	0,18	2,51	2,28	4,57	0,14	0,40
RS-02	68,54	0,34	12,25	6,76	0,07	0,50	3,71	2,22	4,95	0,21	0,48
RS-03	68,84	0,23	11,11	8,34	0,08	0,30	2,87	2,20	5,27	0,11	0,66
RS-05	67,24	0,33	12,14	9,73	0,11	0,48	2,29	2,14	5,05	0,19	0,31
RS-06	70,39	0,16	10,90	9,27	0,08	0,17	1,31	2,11	5,17	0,13	0,32
RS-07	65,66	0,88	13,10	10,15	0,15	2,32	2,13	1,92	3,30	0,17	0,23
RS-09	67,55	0,13	12,39	8,40	0,09	0,15	3,63	2,69	4,65	0,09	0,21
RS-11	61,11	0,71	13,05	11,82	0,11	0,72	3,82	3,05	5,11	0,18	0,32
RS-12	61,65	0,68	12,53	12,44	0,13	0,71	3,67	2,56	5,21	0,25	0,16
RS-13	70,19	0,05	11,87	6,66	0,06	0,05	2,97	3,34	4,01	0,01	0,81
RS-14	70,07	0,21	11,61	7,51	0,10	0,28	2,40	2,16	5,43	0,11	0,11
RS-15	64,61	0,06	11,44	14,00	0,19	0,09	1,90	3,38	3,79	0,12	0,40
RS-16	64,17	0,74	12,42	10,84	0,12	0,77	2,94	2,71	4,91	0,29	0,10
RS-17	66,81	0,29	11,24	10,85	0,11	0,22	3,01	2,18	5,05	0,15	0,11
RS-18	62,04	0,22	11,12	14,05	0,14	0,51	4,07	2,61	4,86	0,08	0,29
RS-19	63,35	0,30	11,44	11,39	0,13	0,34	4,92	2,23	4,93	0,18	0,81
RS-20	61,82	0,10	10,21	8,50	0,11	1,27	6,54	2,51	4,80	0,05	4,10
RS-21	51,16	1,21	14,77	15,59	0,25	1,19	5,95	4,95	3,91	0,70	0,32
RS-22	58,44	0,23	10,70	15,70	0,12	0,31	6,48	4,77	1,98	0,09	1,18
RS-23	56,45	0,32	8,28	14,32	0,18	0,67	10,25	2,03	1,57	0,11	5,82
RS-24	53,07	0,82	15,42	10,85	0,14	2,62	7,93	3,47	5,26	0,34	0,09
RS-25	67,41	0,24	11,13	7,59	0,09	0,29	4,19	2,13	5,11	0,12	1,69
RS-26	60,21	0,59	11,70	8,31	0,10	1,89	6,95	2,52	2,78	0,17	4,80
RS-27	48,27	3,06	14,00	13,89	0,16	4,41	8,64	2,58	2,26	1,81	0,93
RS-28	61,86	0,85	14,09	10,56	0,15	2,39	3,06	2,01	3,40	0,10	1,52
RS-29	46,58	3,61	14,03	13,86	0,13	5,10	9,76	2,63	1,35	1,65	1,31
RS-30	66,42	0,04	11,12	11,30	0,07	0,06	3,24	4,00	3,48	0,19	0,10
RS-32	57,86	0,60	15,02	12,29	0,11	0,36	4,83	2,93	5,43	0,24	0,33
RS-33	54,32	0,76	12,28	21,38	0,18	0,71	2,71	2,71	4,59	0,32	0,03
RS-35	64,07	0,20	10,40	13,74	0,13	0,17	3,13	2,97	4,54	0,05	0,60
RS-36	68,10	0,08	12,86	7,76	0,07	0,11	2,48	3,58	4,19	0,08	0,69
Média	62,40	0,59	12,10	11,31	0,12	0,95	4,33	2,76	4,22	0,27	0,94
Desvio	6,35	0,77	1,52	3,13	0,04	1,20	2,28	0,74	1,14	0,40	1,36
Min.	46,58	0,04	8,28	6,66	0,06	0,05	1,31	1,92	1,35	0,01	0,03
Max.	70,39	3,61	15,42	21,38	0,25	5,10	10,25	4,95	5,43	1,81	5,82
Rochas Carbonáticas											
RC-01	1,67	0,02	0,65	0,51	0,01	15,83	38,78	0,01	0,03	0,04	42,46
RC-03	12,54	0,81	3,17	3,06	0,00	15,94	31,33	0,37	0,20	0,31	32,23
Média	7,11	0,42	1,91	1,79	0,01	15,89	35,06	0,19	0,12	0,18	37,35
Desvio	5,44	0,40	1,26	1,28	0,01	0,05	3,73	0,18	0,09	0,14	5,12
Min.	1,67	0,02	0,65	0,51	0,00	15,83	31,33	0,01	0,03	0,04	32,23
Max.	12,54	0,81	3,17	3,06	0,01	15,94	38,78	0,37	0,20	0,31	42,46

Legenda: PF – perda ao fogo.

Conforme pode ser visto na Tabela 2, os resíduos de rochas silicáticas apresentam alto teor de SiO₂, seguido por Al₂O₃ e Fe₂O₃ e das carbonáticas possuem altos teores de CaO e MgO, estando em conformidade com a composição típica desses tipos de rochas. O resíduo proveniente de rochas silicáticas contém porcentagens

médias relativamente altas de K_2O (4,22%) e Na_2O (2,76%), enquanto o de rochas carbonáticas apresentam uma porcentagem menor desses óxidos, não chegando a somar 2%. Porém, os resíduos carbonáticos estudados apresentam, em sua composição, aproximadamente 15 vezes mais MgO e 8 vezes mais CaO que a composição média dos resíduos silicáticos.

Outra importante diferença encontra-se na quantidade de óxido férrico presente nas amostras, em média 11,31% para os RS e 1,79% para os RC. Esse fato ocorre devido ao tipo de tear usado no beneficiamentos dessas rochas que necessita da granalha de aço para realizar o corte das rochas em chapas. Como as rochas silicáticas apresentam maior dureza se comparadas com as carbonáticas, notoriamente, utiliza-se mais granalha em seu beneficiamento.

Entre as rochas silicáticas há uma variação considerável nas concentrações de óxido de silício, de 46,58% a 70,39% e de óxido férrico, de 6,66 a 21,38% e variações menores nos óxidos de magnésio e cálcio.

A Figura 3 confronta a composição química da argila utilizada neste estudo com a composição química média, em termos percentuais, dos resíduos de rochas silicáticas e carbonáticas coletados. Observa-se que a composição da argila e dos resíduos silicáticos se assemelham mais, e que a argila apresenta valor de perda ao fogo intermediário entre os dois tipos de resíduos.

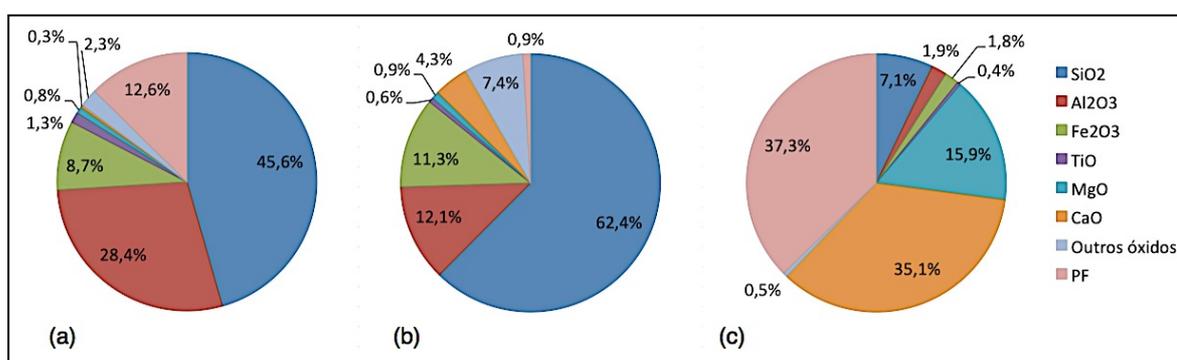


Figura 3 - Composição química média (a) da argila, (b) dos resíduos silicáticos e (c) dos resíduos carbonáticos estudados neste trabalho.

5.1.3. Mineralogia dos resíduos

Os resíduos de rocha ornamental foram divididos em 6 grupos de acordo com a mineralogia encontrada. O Grupo 1, o maior grupo, é o grupo em que apenas foram

identificados minerais de quartzo (SiO_2), microclínio (KAlSi_3O_8), plagioclásio ($(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$) e mica ($(\text{K,Na,Ca})_2(\text{Al,Mg,Fe,Li})_{4-6}(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH,F})_4$). Os difratogramas do Grupo 1 estão apresentados na Figura 4.

Ainda analisando o Grupo 1, observa-se que alguns difratogramas apresentam mais semelhança que outros. Os resíduos RS-01, RS-02 e RS-03 são muito semelhantes, e o mesmo ocorre entre os resíduos RS-05 e RS-19 e os resíduos RS-11, RS-12 e RS-25.

Os difratogramas do Grupo 2, representados na Figura 5, são compostos por resíduos silicáticos que possuem os minerais de quartzo, microclínio, plagioclásio, mica, enstatita ($(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$) e edenite ($\text{NaCa}_2\text{MgSi}_7\text{O}_{22}(\text{OH})_2$).

Os resíduos pertencentes ao Grupo 3 são silicáticos e seus difratogramas estão apresentados na Figura 6. Esses apresentam picos de minerais de quartzo, microclínio, plagioclásio, mica, calcita (CaCO_3) e piroxênio ($(\text{Ca,Na,Fe,Mg,Zn,Mn,Li})(\text{Cr,Al,Fe,Mg,Mn,Ti,P})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$). Nesse conjunto, observa-se que os picos dos resíduos RS-20 e RS-23 se assemelham mais em comparação ao resíduo RS-26.

O Grupo 4 é composto por resíduos de rochas ornamentais silicáticas que possuem em sua composição minerais de quartzo, plagioclásio e mica identificados em seus difratogramas. Os picos dos minerais descritos podem ser observados na Figura 7.

O Grupo 5 é composto por resíduos de rochas silicáticas que possuem um conjunto de minerais característicos de cada um, que não foram encontrados em outros resíduos. O resíduo RS-07 apresenta em seu difratograma picos de quartzo, microclínio, plagioclásio, mica, piropo ($\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) e cordierita ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$); o RS-18 possui em sua composição minerais de quartzo, microclínio, plagioclásio, mica e clorita ($(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$); o resíduo RS-22 é composto por quartzo, plagioclásio e mica; o RS-28 é composto por quartzo, plagioclásio e calcita; o resíduo RS-30 é composto por minerais de quartzo, plagioclásio e microclínio e o RS-33 apresenta em seu difratograma picos de quartzo, microclínio, plagioclásio, mica e piroxênio. Os difratogramas desses resíduos podem ser visualizados na Figura 8.

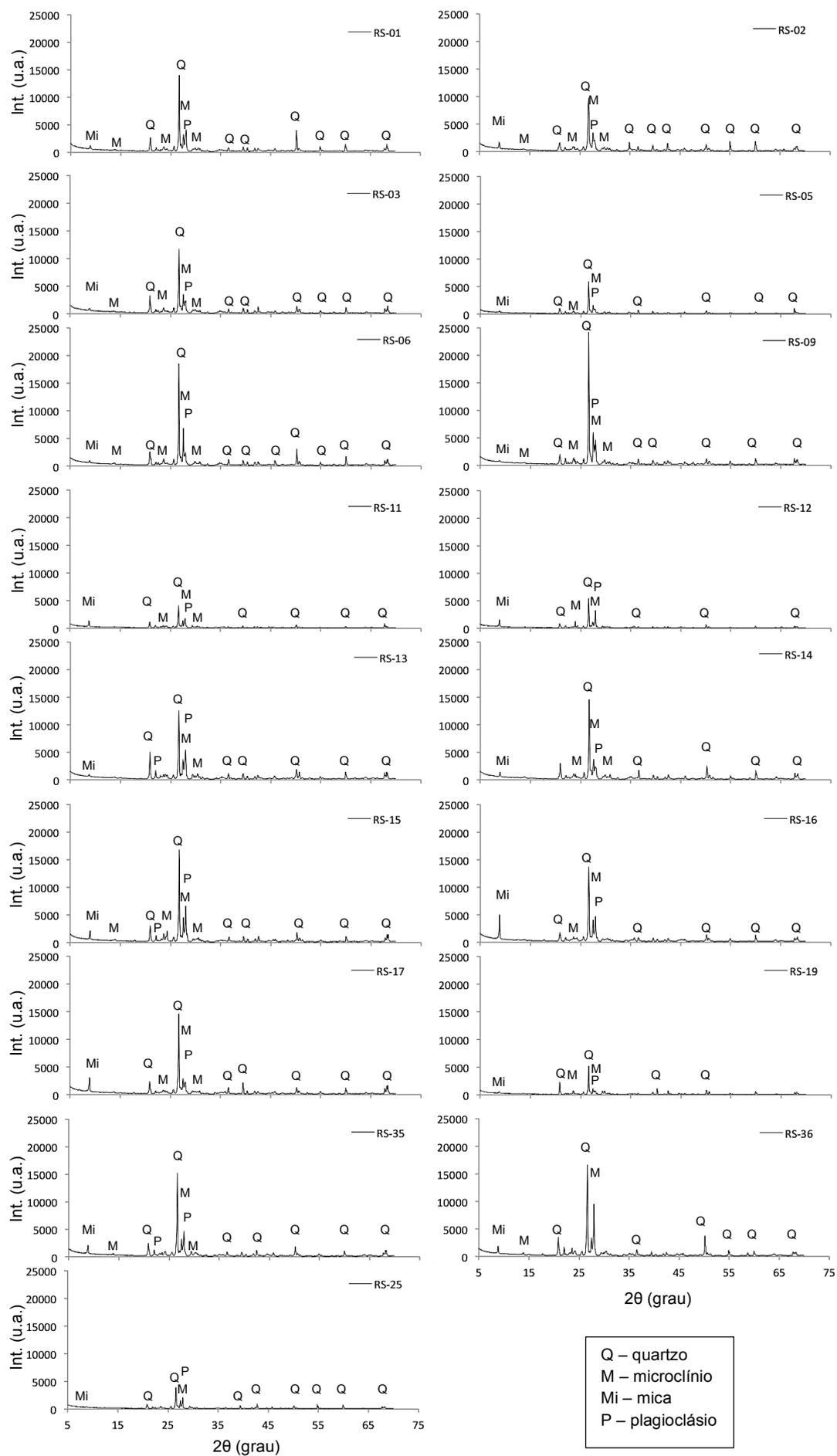


Figura 4 - Difratoformas dos resíduos silicáticos pertencentes ao Grupo 1.

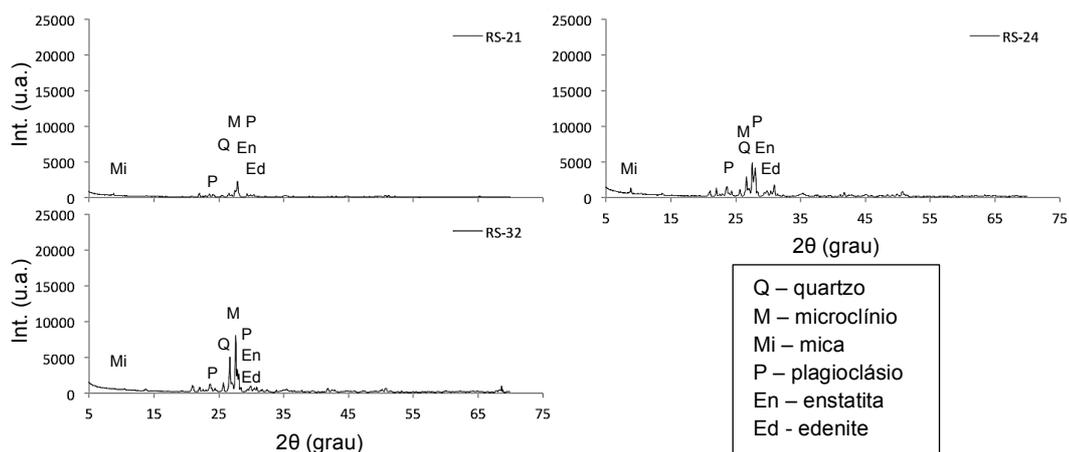


Figura 5 – Difratoograma dos resíduos silicáticos pertencentes ao Grupo 2.

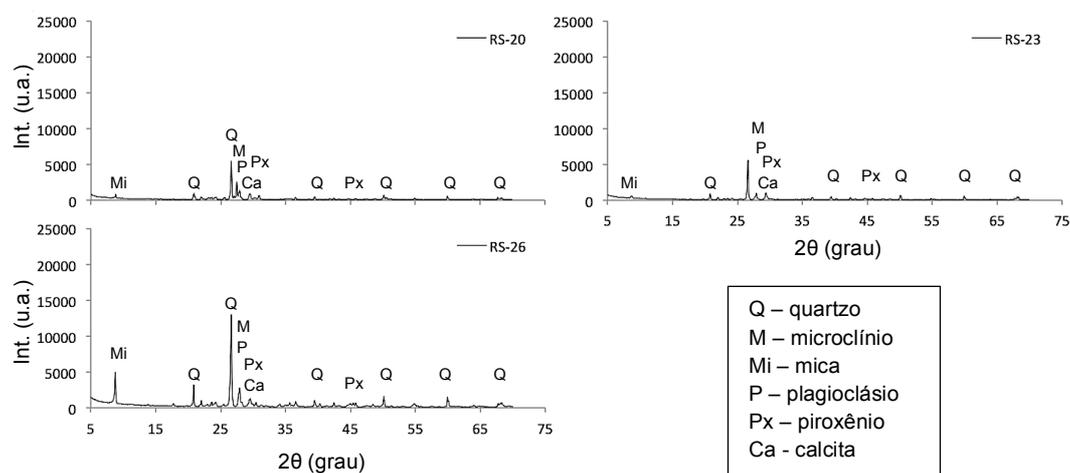


Figura 6 – Difratoograma dos resíduos silicáticos pertencentes ao Grupo 3.

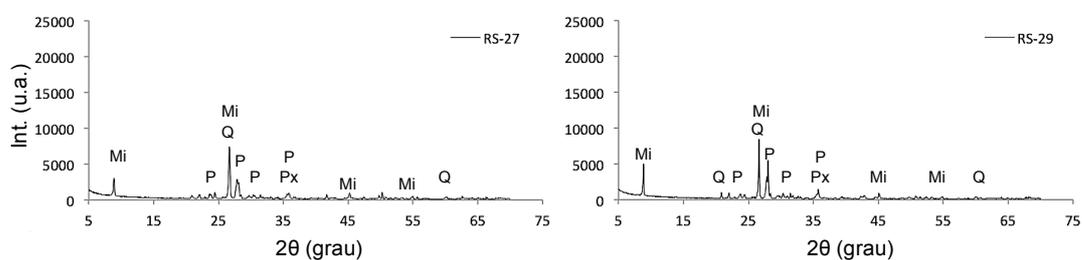


Figura 7 - Difratoograma dos resíduos silicáticos pertencentes ao Grupo 4. Legenda: Q – quartzo, Mi – mica, P – plagioclásio, Px – piroxênio.

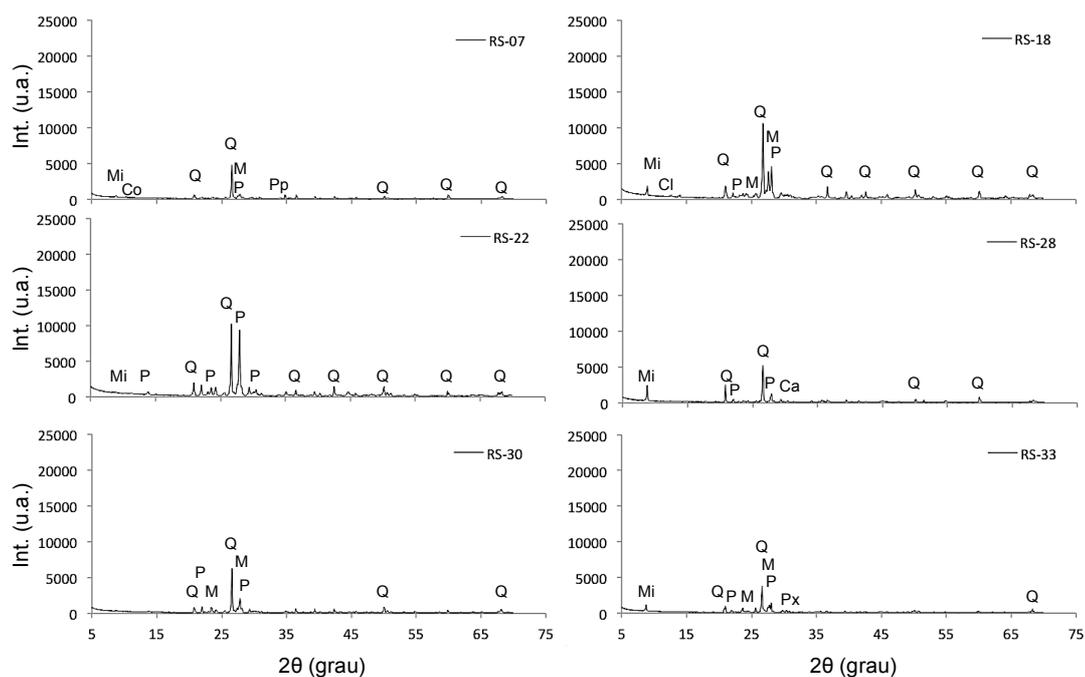


Figura 8 - Difratograma dos resíduos silicáticos pertencentes ao Grupo 5. Legenda: Q – quartzo, Mi – mica, M – microclínio, P – plagioclásio, Px – piroxênio, Pp – piropo, Cl – clorita, Co – cordierita, Ca - calcita.

Os difratogramas dos dois resíduos de rochas carbonáticas estão expostos na Figura 9. O difratograma do resíduo RC-01 apresenta picos de minerais de calcita e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), enquanto o RC-03, além de apresentar picos de calcita e dolomita, também foram encontrados picos de anortita ($\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$), paligorsquita ($(\text{Mg,Al,Fe})_5\text{SiO}(\text{OH}_2)(\text{OH}_2)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) e tremolita ($\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$).

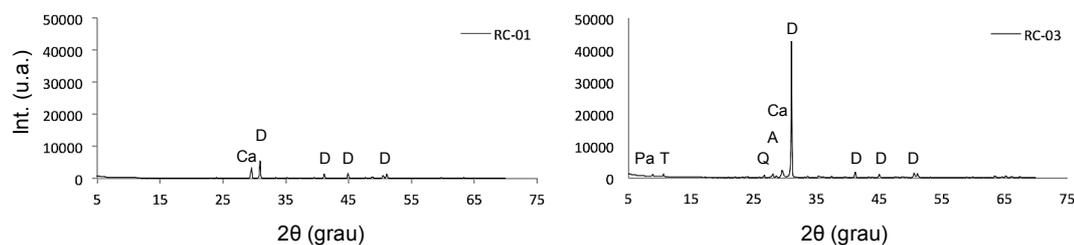


Figura 9 - Difratograma dos resíduos carbonáticos pertencentes ao Grupo 6. Legenda: Ca – calcita, D – dolomita, A – anortita, Pa – paligorsquita, T – tremolita.

5.2. Correlação da composição química

A Tabela 3 correlaciona os componentes químicos principais presentes nas amostras. Nela, observa-se que a concentração de SiO_2 é inversamente

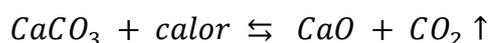
proporcional à concentração dos óxidos alcalinos MgO e CaO e à perda ao fogo, pois rochas ornamentais silicáticas possuem quantidades menores desses óxidos e esses são encontrados nos principais minerais (calcita e dolomita) presentes em rochas carbonáticas.

Tabela 3 - Matriz de correlação da composição química média dos resíduos estudados.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
SiO ₂	1,00										
TiO ₂	-0,28	1,00									
Al ₂ O ₃	0,36	0,35	1,00								
Fe ₂ O ₃	0,33	0,28	0,31	1,00							
MnO	0,33	0,22	0,11	0,79	1,00						
MgO	-0,93	0,22	-0,54	-0,51	-0,42	1,00					
CaO	-0,92	0,08	-0,65	-0,49	-0,38	0,96	1,00				
Na ₂ O	0,50	-0,04	0,11	0,57	0,59	-0,55	-0,47	1,00			
K ₂ O	0,77	-0,38	0,18	0,21	0,28	-0,71	-0,68	0,39	1,00		
P ₂ O ₅	-0,22	0,92	0,13	0,31	0,31	0,21	0,11	0,14	-0,28	1,00	
LOI	-0,91	-0,04	-0,48	-0,60	-0,57	0,91	0,92	-0,66	-0,71	-0,10	1,00

Valores em negrito indicam alta correlação positiva ou negativa

A alta perda ao fogo (PF) dos RC, deve-se à calcinação do calcário calcítico e magnesiano, formando a cal (CaO). Nesse processo, cerca de 44% da massa original do CaCO₃ é reduzida, liberando CO₂ no processo. Quando são calcários magnesianos, a perda ao fogo pode atingir valores de 48% (LUZ; LINS, 2008). Abaixo, segue a reação química de calcinação do calcário:



Também é possível observar na Tabela 3 uma forte correlação entre a concentração de SiO₂ e K₂O, pois esses componentes são encontrados em maiores quantidades em rochas silicáticas, oriundas de minerais como o quartzo e feldspatos. O mesmo ocorre com as composições de Fe₂O₃ e MnO que estão mais presentes nos resíduos de rochas silicáticas, porém, enquanto o MnO provém de minerais como os piroxênios, o ferro está presente em maior quantidade nos resíduos silicáticos porque esses resíduos possuem maior dureza e, portanto, necessitam de mais granalha de ferro durante o beneficiamento. O TiO₂ e P₂O₅ estão relacionados, possivelmente, por causa dos piroxênios encontrados em rochas silicáticas, visto

que esses minerais podem apresentar em sua composição elementos de fósforo e titânio.

5.3. Propriedades físicas das peças cerâmicas

Na Figura 10, pode ser observado as propriedades físicas de retração volumétrica, massa específica real, massa específica aparente e densidade relativa dos corpos de prova fabricados.

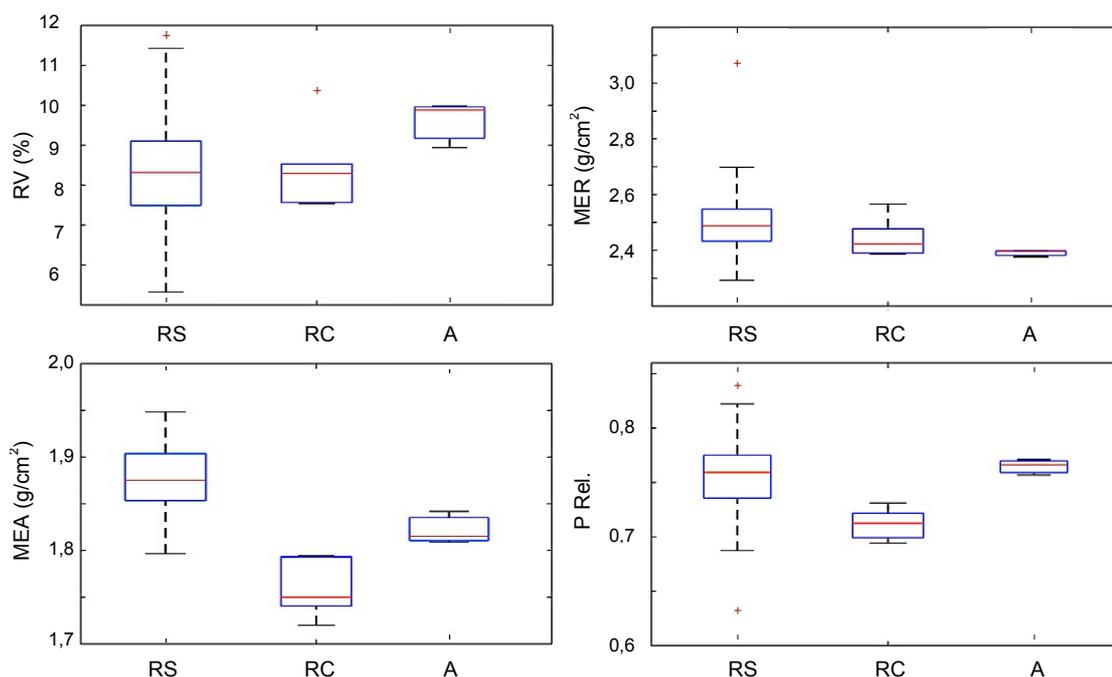


Figura 10 – Propriedades físicas dos corpos de prova cerâmicos. RV - retração volumétrica, Legenda: MER – massa específica real, MEA – massa específica aparente, ρ Rel. – densidade relativa, RS – resíduos silicáticos, RC – resíduos carbonáticos, A – argila pura.

A retração volumétrica dos resíduos silicáticos (RS) possui uma grande variabilidade de valores. O menor foi 5,26% do resíduo RS-07, que possui o menor valor médio também de 5,44%, com desvio padrão de 0,17 o maior foi 11,88% do resíduo RS-26, que possui também o maior valor médio de $10,87 \pm 0,81\%$. O valor máximo de 11,88 foi considerado um *outliers*, simbolizando que este valor difere muito do conjunto. A variabilidade de valores deve-se ao fato de os resíduos silicáticos possuírem diferentes composições químicas e mineralógicas e por serem analisadas uma grande quantidade de amostras.

A retração volumétrica dos RC obteve valor máximo de 10,36% referente ao resíduo RC-01, e valor mínimo de 7,53% referente ao resíduo RC-03. A argila sem adição de resíduos obteve valor máximo e mínimo de 10,01% e 8,94%, respectivamente.

É importante notar também que a mediana, representada no gráfico por uma linha vermelha, foi de 8,34% para os resíduos carbonáticos (RC) e este valor é muito próximo à mediana dos resíduos silicáticos com valor de 8,27%, enquanto a mediana da argila pura foi de 9,90%.

A massa específica real (MER) dos corpos de prova incorporados com resíduos silicáticos apresentou valor máximo de $3,07 \text{ g/cm}^3$, referente ao resíduo de RS-19, que foi considerado um *outliers*, seguido pelo valor de $2,69 \text{ g/cm}^3$ do resíduo RS-24 e valor mínimo de $2,28 \text{ g/cm}^3$ referente ao RS-07. Os resíduos carbonático apresentaram valor máximo de $2,56 \text{ g/cm}^3$ e valor mínimo de $2,38 \text{ g/cm}^3$, ambos correspondentes ao resíduo RC-03. A MER da argila pura apresentou valores de $2,36 \text{ g/cm}^3$ e $2,35 \text{ g/cm}^3$, máximo e mínimo respectivamente.

A massa específica aparente (MEA) dos corpos de prova cerâmicos com adição de resíduos silicáticos apresentaram valores maiores que os resíduos carbonáticos. Os corpos de prova fabricados com resíduos silicáticos obtiveram valores máximo e mínimo de $1,94 \text{ g/cm}^3$ e $1,79 \text{ g/cm}^3$ e os carbonáticos apresentaram valores máximo e mínimo de $1,79 \text{ g/cm}^3$ e $1,71 \text{ g/cm}^3$. Os valores máximo e mínimo referentes aos corpos de prova sem adição de argila foram $1,75$ e $1,73 \text{ g/cm}^3$.

Os valores de MER são maiores que os valores de MEA, pois eles não levam em consideração os poros presentes nas amostras. É possível observar que a MER dos corpos de prova não possuem uma tendência em relação ao tipo de resíduo, porém é visível que os valores de MEA das peças cerâmicas com adição de resíduos silicáticos são maiores que com a adição de resíduos carbonáticos.

A densidade relativa (ρ Rel.) dos corpos de prova dos resíduos silicáticos obtiveram valor máximo de 0,84 relativo ao resíduo RS-07 e valor mínimo de 0,62 relativo ao resíduo RS-19. Com a adição dos resíduos carbonáticos o valor máximo foi de 0,73, referente ao resíduo RC-03, e o valor mínimo foi de 0,69 referente ao resíduo RC-01. A argila pura obteve; 0,69 e 0,64; como valores máximos e mínimos, respectivamente.

A Figura 11 compara os *boxplots* dos resultados do ensaio de absorção de água (AA) dos resíduos silicáticos, carbonáticos e da argila pura. A máxima absorção de água utilizando resíduos silicáticos foi de 15,65% com o resíduo RS-06 e a mínima

foi de 13,45% com o resíduo RS-19. As peças cerâmicas incorporadas com resíduos carbonáticos alcançaram valores máximos de 17,96% com o resíduo RC-01 e mínimo de 16,43% com o resíduo RC-03. Os corpos de prova sem a incorporação de resíduos obtiveram mínima AA de 15,67% e máxima de 16,16%.

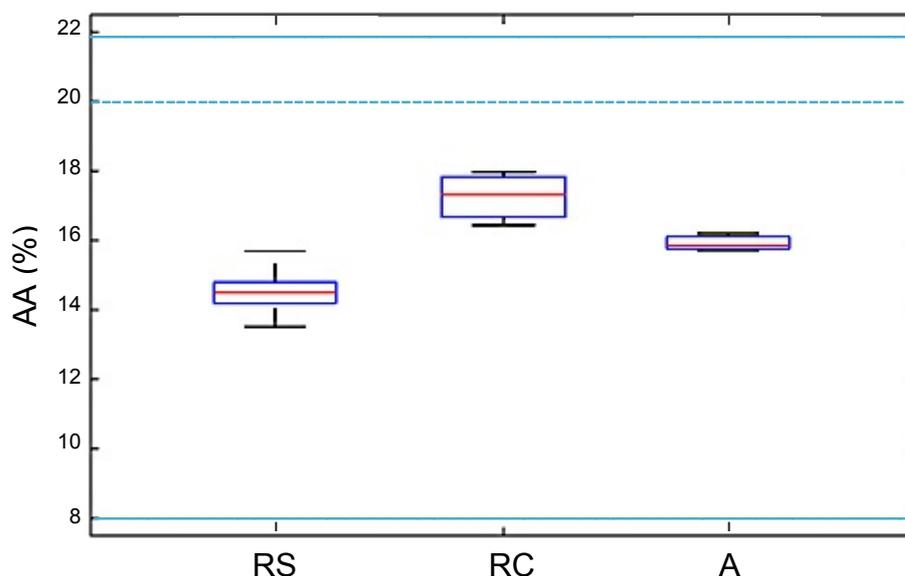


Figura 11 - Absorção de água pelos corpos de prova cerâmicos. Legenda: RS – resíduos silicáticos, RC – resíduos carbonáticos, A – argila pura, linha tracejada – limite de AA para blocos, linha reta – limite de AA para telhas.

A absorção de água é um importante ensaio realizado em peças cerâmicas e determinante para que as mesmas possam ser comercializadas. Segundo Soltan et al. (2016) esse parâmetro está relacionado com a durabilidade e a estabilidade das peças. Segundo a NBR 15310 (ABNT, 2005d), para que seja permitida a fabricação de telhas cerâmicas, a absorção de água não pode ultrapassar o valor de 20%, ilustrado na Figura 13 por uma linha tracejada. A mesma norma também sugere outros limites de AA dependendo das condições climáticas locais. Se o clima do local for frio e ameno, a AA não deve ultrapassar o limite de 12% ou se o local for considerado muito frio e úmido durante vários períodos, inclusive sujeitos a ciclos frequentes de gelo e degelo, a AA deve ser igual ou menor a 7%. Portanto, para locais de clima temperado ou tropical, no qual a AA não ultrapasse 20%, todas as cerâmicas fabricadas nesse trabalho estão adequadas a essa propriedade.

Para a fabricação de blocos cerâmicos para alvenaria de vedação, os valores obtidos no ensaio de AA deve estar compreendido entre os limites de 8% e 22% (ABNT, 2005a). Os limites mencionados estão representados na Figura 13 por duas linhas retas e pode ser observado, portanto, que todos os corpos cerâmicos fabricados nesse trabalho também estão de acordo com esse parâmetro.

É válido observar também, que as peças cerâmicas incorporadas com resíduos silicáticos obtiveram menores resultados de AA quando comparadas com as peças cerâmicas incorporadas com resíduos carbonáticos.

5.4. Influência da composição química dos resíduos nas propriedades cerâmicas

Na Tabela 4 está representado os índices de correlação entre as composições químicas e as propriedades físicas dos corpos de prova cerâmicos. Foram destacados em negritos os valores de coeficientes de correlação maiores que 0,75 e menores que -0,75.

Tabela 4 – Coeficientes de correlação entre a composição química dos resíduos e as propriedades físicas das cerâmicas.

	RV	MER	MEA	ρ Rel.	AA
SiO₂	-0,16	-0,06	0,64	0,13	-0,76
TiO₂	0,15	-0,03	0,22	0,22	-0,16
Al₂O₃	-0,05	-0,12	0,67	0,27	-0,79
Fe₂O₃	0,00	0,22	0,45	0,20	-0,51
MnO	0,02	0,14	0,42	0,22	-0,50
MgO	0,06	-0,04	-0,62	-0,23	0,76
CaO	0,18	0,02	-0,70	-0,14	0,82
Na₂O	0,03	0,21	0,32	0,24	-0,52
K₂O	-0,13	0,04	0,46	0,11	-0,56
P₂O₅	0,11	0,00	0,24	0,22	-0,18
LOI	0,10	-0,07	-0,73	-0,24	0,86

Legenda: RV – retração volumétrica, MER – massa específica real, MEA – massa específica aparente, ρ Rel. – densidade relativa, AA – absorção de água.

A absorção de água (AA) é a única propriedade física estudada que possui altas correlações com a composição química. A maior correlação observada foi de 0,86 com a perda ao fogo, indicando que quanto maior a perda ao fogo, maior a AA. Os resíduos carbonáticos possuem alta perda ao fogo, tornando portanto, os resíduos silicáticos melhores resíduos para serem incorporados em peças cerâmicas.

As correlações com as outras composições químicas também indicam que a adição de resíduos silicáticos diminuem a AA. SiO₂ e Al₂O₃ são os componentes presentes em maiores quantidades nos resíduos silicáticos, em média 74%, enquanto que a concentração desses componentes nos resíduos carbonáticos é de 9%, como foi observado na Figura 4 e esses componentes são inversamente proporcionais a AA. Depois da perda ao fogo, as maiores concentrações encontradas nos resíduos carbonáticos são CaO e MgO, em média 51%, enquanto que os resíduos silicáticos possuem em média 5,2% desses componentes. As concentrações de CaO e Mg são diretamente proporcionais à AA.

5.4.1. *Influência da composição dos resíduos de rochas ornamentais silicáticas nas propriedades cerâmicas*

A Tabela 5 possui os coeficientes de correlação das propriedades físicas com a composição química apenas dos corpos de prova incorporados com os resíduos de rochas ornamentais silicáticas. Observa-se que nenhuma composição química presente nos resíduos silicáticos é capaz de explicar separadamente os valores das propriedades físicas estudadas.

Tabela 5 – Coeficientes de correlação entre a composição química dos resíduos e as propriedades físicas das cerâmicas.

	RV	MER	MEA	ρ Rel.	AA
SiO₂	-0,34	0,01	-0,36	0,01	-0,28
TiO₂	0,17	-0,17	0,22	0,24	0,01
Al₂O₃	-0,04	-0,27	0,02	0,19	0,12
Fe₂O₃	0,02	-0,02	0,02	0,05	0,23
MnO	0,03	-0,07	0,05	0,04	0,14
MgO	0,17	-0,11	0,21	0,15	0,03
CaO	0,53	0,11	0,53	-0,16	0,29
Na₂O	0,06	0,05	0,05	-0,24	0,22
K₂O	-0,13	-0,02	-0,13	0,01	0,00
P₂O₅	0,15	-0,21	0,22	0,27	-0,01
LOI	0,46	0,38	0,39	-0,32	0,00

Legenda: RV – retração volumétrica, MER – massa específica real, MEA – massa específica aparente, ρ Rel. – densidade relativa, AA – absorção de água.

5.5. Influência da composição mineralógica dos resíduos nas propriedades cerâmicas

A Figura 12 expõe em *box-plots* os valores das propriedades físicas dos corpos de prova cerâmicos adicionados com resíduos de rocha por grupo mineralógico.

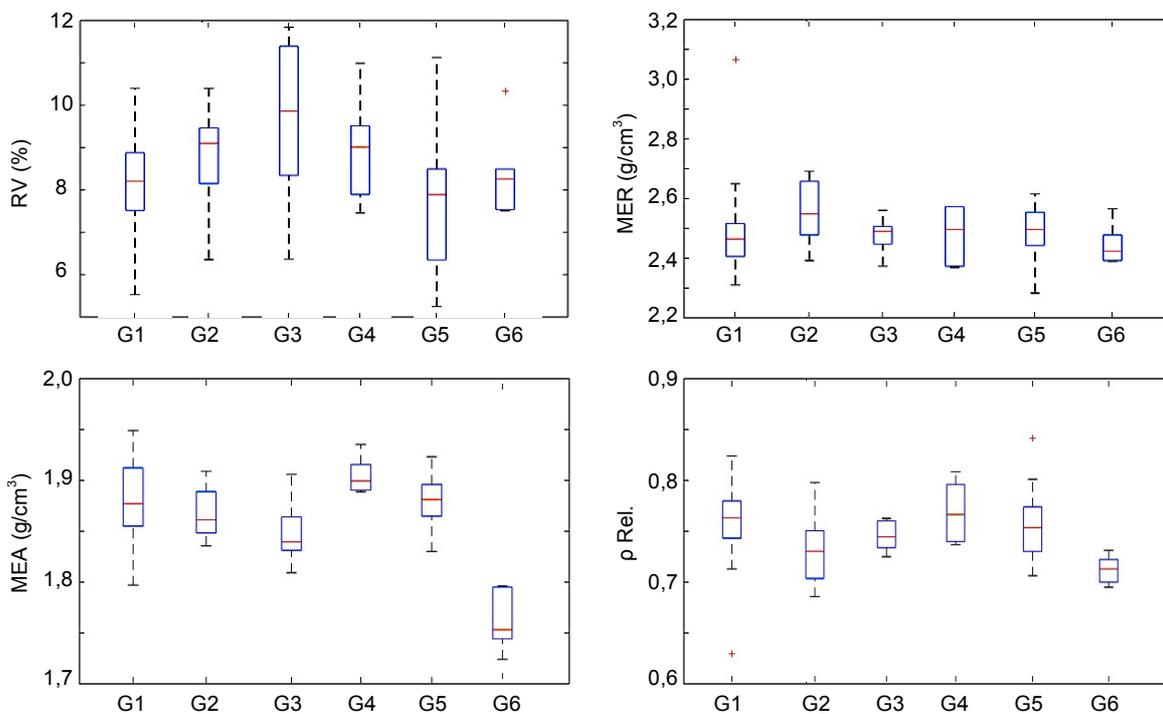


Figura 12 – Propriedades físicas dos corpos de prova por grupos mineralógicos. Legenda: RV – retração volumétrica, MER – massa específica real, MEA – massa específica aparente, ρ Rel. – densidade relativa, AA – absorção de água.

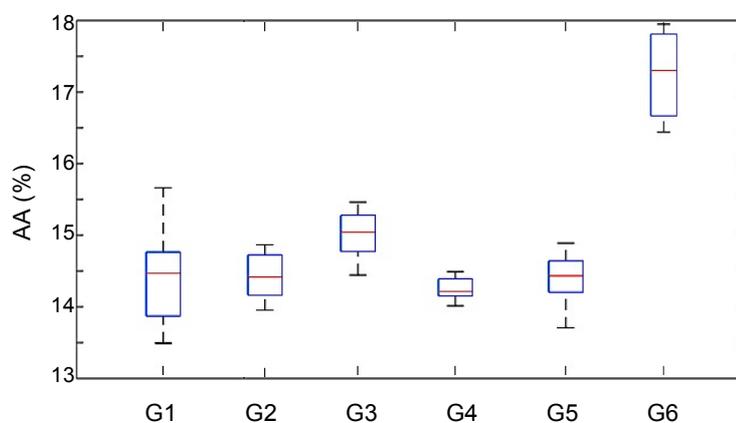


Figura 13 – Absorção de água pelos corpos de prova por grupos mineralógicos.

A retração volumétrica (RV), a massa específica real (MER) e a densidade relativa (ρ Rel.) não apresentam diferenças significativa entre os grupos. Porém observa-se que a massa específica aparente (MEA) possui uma relação inversa com a absorção de água (AA), representada na Figura 15.

Quanto maior a MEA das peças cerâmicas, menor a AA. Soltan et al. (2016) observaram que a fase líquida se infiltra nos poros e esse processo causa densificação nos corpos cerâmicos durante a sinterização, tornando os corpos de prova com maior densidade, menos porosos e, portanto, absorvendo menos água.

5.6. Microscopia digital

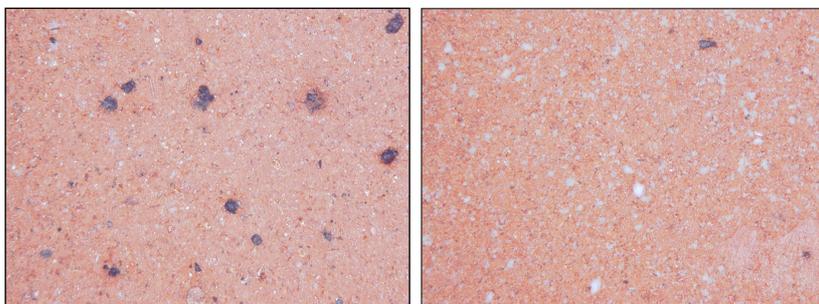


Figura 14 – Corpos de prova cerâmicos (a) peças e microscopia digital em (b) 50x e (c) 200x. (1) com a adição de resíduo silicático (RS-19), (2) de resíduo carbonático (RC-01) e (3) sem adição de resíduo.

Os corpos de prova em tamanho real e suas microscopias ópticas com aproximação de 50 vezes e 200 vezes podem ser observados na Figura 14. Nos copos cerâmicos com adição do resíduos silicáticos, Figura 14 (a.1, 2 e 3), é possível observar pequenos pontos de coloração escura, provenientes, possivelmente, do ferro presente na gralha utilizada durante o beneficiamento. Nas peças com adição de resíduos carbonáticos, Figura 14 (b.1, 2 e 3), observa-se pequenos pontos brancos, porém sem elevações. As peças sem adição de resíduo, Figura 14 (c.1, 2 e 3) possuem um aspecto mais uniforme.

Na Figura 15, com uma aproximação de 700 vezes, é possível observar que as peças apresentam superfície rugosa e fraturada. Este fato também foi constatado na microscopia do tijolo fabricado por Soltan et al. (2016), sinterizado a 1000 °C. A microscopia foi caracterizada pela densificação incompleta com fusão parcial dos minerais, apresentando poros com aberturas interconectadas. Porém a quantidade de vazios e defeitos é maior quando incorporamos resíduos carbonáticos.

Vidal et al. (2014) afirmaram que a função do resíduo de rocha ornamental na cerâmica é como fundente, diminuindo a temperatura de vitrificação e queima da cerâmica e portanto, diminuindo a porosidade. Este fato foi observado nas peças cerâmicas com a adição de resíduos silicáticos, mas o efeito foi contrário quando adicionados 20% em massa de resíduo de rochas carbonáticas nos corpos cerâmicos. Esse fato deve-se a calcinação dos componentes carbonáticos das peças com adição deste tipo de resíduo, pois essa reação libera uma grande quantidade de CO₂ e deixa vazios nas peças.

A Figura 16 representa a microscopia do resíduo RS-19 que obteve o menor valor de absorção de água e do resíduo RS-06 obteve o maior valor. Na Figura 16 (a), observa-se a presença de mais rachaduras e portanto, mais porosidade na peça cerâmica incorporada com o resíduos RS-06 em comparação com a peça incorporada com o resíduo RS-19, representada na Figura 16 (b). As setas representadas nas figuras indicam a formação de fase vítrea, evidenciado pela aparência das bordas dos aglomerados de minerais, e nota-se que houve mais formação de fase vítrea na peça com o resíduo RS-19. Soltan et al. (2016) também observaram formação de fase líquida por volta de 1000 °C em suas peças cerâmicas.

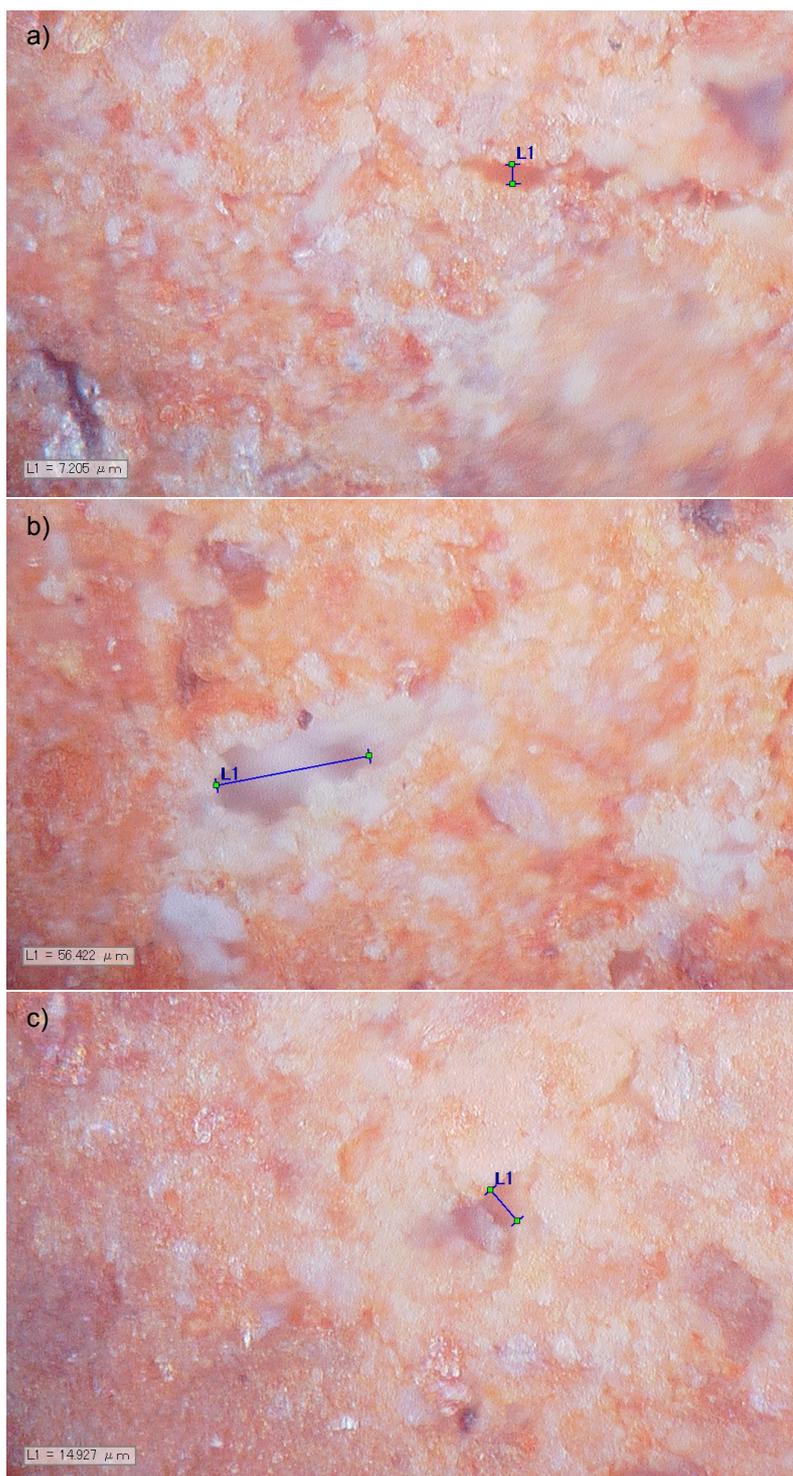


Figura 15 – Microscopia óptica em 700x dos corpos de prova cerâmicos (a) com adição de resíduo silicático (RS-19), (b) resíduo carbonático (RS-01) e (c) sem adição de resíduos.

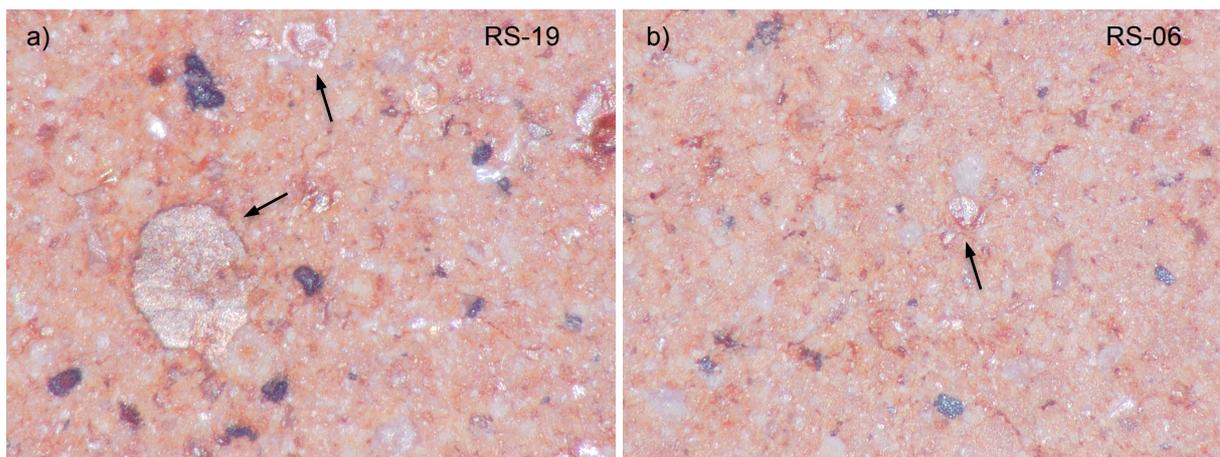


Figura 16 – Microscopia óptica em 200x das peças cerâmicas incorporadas com (a) resíduo RS-19 e (b) resíduo RS-06.

Para que a peça cerâmica possua melhores propriedades é necessário que haja um arranjo das três fases encontradas em uma peça cerâmica, a fase vítrea, cristalina e porosa. Para tanto, os resíduos incorporado devem possuir em sua composição minerais que auxiliam a formação da fase cristalina, apresentando moléculas e íons que se organizam de maneira fixa, repetitiva e regular e auxiliando, desta forma, na estabilidade e densidade das peças; na formação da fase vítrea, funcionando como um ligante das fases cristalinas e aumentando a resistência da cerâmica e que diminuem a fase porosa, pois esta permite a absorção de água por seus poros.

6. CONCLUSÕES

A granulometria dos resíduos é naturalmente fina, devido ao processo de corte dos blocos de rochas ornamentais, podendo portanto, ser incorporados às peças cerâmicas sem nenhum processo adicional de cominuição.

Os resultados experimentais indicam que os resíduos provenientes da serragem de rochas silicáticas se assemelham à argila utilizada na fabricação de cerâmica vermelha. Isso ocorre devido à presença de minerais como quartzo e feldspatos nos resíduos silicáticos. Enquanto os resíduos carbonáticos se diferem da argila na composição química e mineral, devido a presença dos minerais calcita e dolomita, encontrados com abundância neste tipo de resíduos.

Os testes físicos realizados com os corpos de prova cerâmicos incorporados com resíduos de rochas ornamentais, indicam que é possível a utilização de 20% de resíduos de rochas ornamentais em massas para cerâmica vermelha sinterizadas em forno de queima cerâmica a 1000 °C por uma hora.

A absorção de água das peças cerâmicas está fortemente relacionada com a perda ao fogo dos resíduos utilizados. Resíduos que possuem baixa perda ao fogo, os silicáticos, possuem menor absorção de água e portanto menor porosidade como observado na microscopia.

7. REFERÊNCIAS

ABCERAM, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. Informações técnicas. Portal ABCERAM [Online]. Disponível em: <<http://abceram.org.br>>. Acesso em: 3 maio 2018.

ABIROCHAS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Exportações e Importações Brasileiras de Rochas - Dezembro 2016. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br/estatisticas.php>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

ABIROCHAS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Portal Abirochas [Online]. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br/>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

ACCHAR, W.; VIEIRA, F. A.; HOTZA, D. Effect of marble and granite sludge in clay materials. **Materials Science and Engineering: A**, v. 419, p. 306-309, mar. 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. **Materials Science and Engineering: A**, v. 435-436, p. 606-610, nov. 2006.

ALENCAR, C. R. A. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais.** 1º. ed. Cachoeiro de Itapemirim: Instituto Euvaldo Lodi - IEL, 2013. 242 p. Disponível em: <<http://www.sindirochas.com/arquivos/manual-rochas.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2018.

ANFACER, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. História da cerâmica. Portal ANFACER [Online]. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/historia-ceramica>>. Acesso em: 3 maio 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15012:** Rochas para revestimentos de edificações – Terminologia. Rio de Janeiro, 2003. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1:** Componentes Cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005a. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2**: Componentes Cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005b. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-3**: Componentes Cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural de vedação – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005c. 47 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15310**: Componentes Cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005d. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6460**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Variação da resistência à compressão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983a. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7170**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1983b. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8041**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Formas e dimensões – Padronização. Rio de Janeiro, 1983c. 2 p.

BOLTAKOVA, N. V.; FASEEVA, G. R.; KABIROV, R. R.; NAFIKOV, R. M.; ZAKHAROV, YU. A. Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000–2015. **Waste Management**, p. 1-17, nov.. 2016.

BRASIL. Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário oficial da Republica Federativa do Brasil. Brasília, DF, n. 147, p. 3. 3 ago. 2010. Seção 1, pt. 1.

ELICHE-QUESADA, D.; CORPAS-IGLESIAS, F. A.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; IGLESIAS-GODINO, F. J. Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing. **Construction and Building Materials**. v. 34, p. 275-284, abr. 2012.

FEAM, Fundação Estadual de Meio Ambiente; FIEMG, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha**. Belo Horizonte, 2013. 59 p.

FERNANDES, F. R. C.; ENRÍQUEZ, M. A. R. S.; ALAMINO, R. C. J. (Eds.). **Recursos Minerais & Sustentabilidade Territorial**: grandes minas. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2011. 343 p. v. 1.

LABTEC ROCHAS. Classificações das rochas ornamentais e de revestimento. Portal LABTEC [Online]. Disponível em: <<http://www.cpmtc-igc-ufmg.org/labtecrochas/index.html>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e minerais industriais no Brasil**: usos e especificações. 2ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990 p.

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

MENEZES, R. R.; ALMEIDA, R. R. de; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. de A.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos. **Cerâmica**, v. 53, p. 192-199, 2007.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. de A.; FERREIRA, H. C. Uso de rejeitos de granitos como matérias-primas cerâmicas. **Cerâmica**, v. 48, p. 92-101, jun. 2002.

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

MONTANI, C. **Dossiê Brasil 2015**. Itália: Aldus, 2015. 74 p. Disponível em: <<https://issuu.com/abirochas/docs/dossierbrasile2015>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

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, jul. 2004.

MOREIRA, J. M. S.; MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Processing of red ceramic using ornamental rock powder waste. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 196, p. 88-93, jan. 2008.

MOREIRA, J. M. S.; MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Reaproveitamento de resíduo de rocha ornamental proveniente do Noroeste Fluminense em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 51, n. 319, p. 180-186, set. 2005.

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**, v. 49, p. 262-267, 2003.

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

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

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

SOLTAN, A. M. M.; PÖHLER, K.; FUCHS, F.; EL-RAOOF, F. A.; EL-KALIOUBY, B. A.-H.; KOENING, A.; PÖLLMANN H. Clay-bricks from recycled rock tailings. **Ceramics International**, v. 42, p. 16685-16696, nov. 2016.

SULTANA, Mst. S.; AHMED, A. N.; ZAMAN, M. N.; RAHMAN, Md. A.; BISWAS, P. K.; NANDY, P. K. Utilization of hard rock dust with red clay to produce roof tiles. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 3, p. 22-26, nov. 2015.

TAGUCHI, S. P.; SANTOS, J. C.; GOMES, T. M.; CUNHA, N. A. Avaliação das propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado. **Cerâmica**, v. 60, p. 291-296, 2014.

TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; OLHERO, S.; FERREIRA, J. M. F. Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 29, p. 23-30, jan. 2009.

VIDAL, F. V.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais**: Pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. 700 p.

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, p. 389-394, 2013.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; BARRETO, C. G. W.; CARVALHO, E. A. de; PEITER, C. C. Substituição de areia de quartzo por finos de gnaiss em massa cerâmica para telhas: Teste industrial. **Cerâmica**, v. 54, p. 480-486, 2008.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; BARRETO, C. G. W.; CARVALHO, E. A. de; PEITER, C. C. Substituição de areia de quartzo por finos de gnaiss em massa cerâmica para telhas. **Revista Matéria**, v. 11, n. 3, p. 211-216, ago. 2006.

VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M. Incorporação de pó de rocha sedimentar em massas para telhas cerâmicas – Parte 2: Avaliação microestrutural. **Cerâmica**, v. 59, p. 495-500, 2013.

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

XAVIER, G. C.; SABOYA, F.; MAIA, P. C. A.; ALEXANDRE, J. Análise de processos de degradação acelerada em laboratório para estudo da durabilidade de peças cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduos de granito. **Cerâmica**, v. 55, p. 1-10, 2009.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Retração volumétrica dos corpos de prova cerâmicos

Amostras	RV (%)	Média (%)	Desvio Padrão
RS-01	7,39	8,07	0,48
	8,46		
	8,35		
RS-02	6,21	7,94	1,21
	8,72		
	8,88		
RS-03	7,41	7,96	0,38
	8,24		
	8,23		
RS-05	8,13	7,82	0,45
	8,16		
	7,17		
RS-06	7,94	7,19	1,16
	5,55		
	8,09		
RS-07	5,67	5,44	0,17
	5,26		
	5,39		
RS-09	7,39	7,47	0,41
	7,02		
	8,02		
RS-11	9,22	9,11	0,40
	9,55		
	8,57		
RS-12	8,57	8,43	0,13
	8,46		
	8,25		
RS-13	7,20	7,35	0,61
	8,64		
	7,50		
RS-14	8,53	9,00	0,34
	9,36		
	9,11		
RS-15	6,91	7,11	0,47
	7,76		
	6,66		
RS-16	10,21	9,65	0,40
	9,44		
	9,30		
RS-17	9,40	8,27	1,07
	6,82		
	8,61		
RS-18	9,78	9,11	0,51
	9,02		
	8,53		
RS-19	7,69	8,10	0,37
	7,99		
	8,60		
RS-20	6,39	8,98	2,10
	9,01		
	11,55		

Amostras	RV (%)	Média (%)	Desvio Padrão
RS-21	9,14	8,46	0,48
	8,02		
	8,23		
RS-22	8,05	9,18	1,41
	11,17		
	8,32		
RS-23	8,38	9,37	1,43
	8,33		
	11,40		
RS-24	6,38	8,72	1,71
	9,35		
	10,43		
RS-25	7,84	8,59	0,88
	8,09		
	9,83		
RS-26	11,88	10,87	0,81
	9,89		
	10,83		
RS-27	11,03	9,20	1,45
	9,10		
	7,48		
RS-28	8,92	8,47	0,39
	7,96		
	8,52		
RS-29	8,99	8,82	0,67
	7,92		
	9,55		
RS-30	6,65	7,04	0,59
	7,88		
	6,61		
RS-32	9,94	9,28	0,49
	8,76		
	9,14		
RS-33	6,37	6,70	0,47
	7,36		
	6,36		
RS-35	9,44	9,99	0,41
	10,11		
	10,44		
RS-36	8,92	8,00	0,65
	7,43		
	7,65		
RC-01	8,27	8,98	0,97
	8,31		
	10,36		
RC-03	7,53	7,87	0,46
	7,56		
	8,53		
Argila	9,90	9,62	0,48
	10,01		
	8,94		

APÊNDICE B – Absorção de água dos corpos de prova cerâmicos

Amostras	AA (%)	Média (%)	Desvio Padrão
RS-01	14,13	13,99	0,11
	13,84		
	14,02		
RS-02	13,72	13,72	0,04
	13,68		
	13,78		
RS-03	13,67	13,88	0,31
	13,65		
	14,33		
RS-05	13,61	13,65	0,02
	13,66		
	13,68		
RS-06	15,31	15,38	0,19
	15,65		
	15,19		
RS-07	13,67	13,91	0,20
	13,91		
	14,17		
RS-09	13,83	13,83	0,02
	13,81		
	13,86		
RS-11	14,44	14,95	0,37
	15,09		
	15,32		
RS-12	14,96	14,76	0,14
	14,60		
	14,71		
RS-13	14,74	14,80	0,20
	14,59		
	15,07		
RS-14	14,62	14,91	0,35
	14,70		
	15,40		
RS-15	14,37	14,48	0,13
	14,68		
	14,41		
RS-16	14,43	14,50	0,04
	14,53		
	14,54		
RS-17	14,40	14,55	0,18
	14,82		
	14,43		
RS-18	14,37	14,52	0,12
	14,67		
	14,51		
RS-19	13,86	13,66	0,16
	13,45		
	13,68		
RS-20	15,28	15,22	0,21
	14,94		
	15,44		

Amostras	AA (%)	Média (%)	Desvio Padrão
RS-21	13,94	14,12	0,12
	14,18		
	14,24		
RS-22	14,61	14,74	0,10
	14,74		
	14,86		
RS-23	15,03	15,10	0,10
	15,02		
	15,25		
RS-24	14,05	14,50	0,32
	14,76		
	14,70		
RS-25	14,74	14,75	0,12
	14,60		
	14,91		
RS-26	14,55	14,59	0,16
	14,41		
	14,81		
RS-27	14,12	14,20	0,11
	14,12		
	14,36		
RS-28	14,45	14,61	0,15
	14,56		
	14,81		
RS-29	13,98	14,23	0,19
	14,24		
	14,46		
RS-30	14,16	14,18	0,04
	14,14		
	14,25		
RS-32	14,86	14,56	0,20
	14,40		
	14,42		
RS-33	14,22	14,33	0,08
	14,43		
	14,34		
RS-35	14,44	14,70	0,26
	15,05		
	14,60		
RS-36	14,48	14,60	0,17
	14,84		
	14,46		
RC-01	17,83	17,87	0,06
	17,96		
	17,82		
RC-03	16,80	16,63	0,15
	16,43		
	16,67		
Argila	15,67	15,88	0,20
	16,16		
	15,80		

APÊNDICE C – Massa específica aparente dos corpos de prova cerâmicos

Amostras	MEA (%)	Média (%)	Desvio Padrão	Amostras	MEA (%)	Média (%)	Desvio Padrão
RS-01	1,91	1,92	0,00	RS-21	1,90	1,88	0,02
	1,93				1,84		
	1,92				1,89		
RS-02	1,90	1,93	0,01	RS-22	1,85	1,85	0,01
	1,93				1,87		
	1,94				1,83		
RS-03	1,94	1,92	0,01	RS-23	1,83	1,84	0,01
	1,92				1,82		
	1,90				1,85		
RS-05	1,94	1,94	0,00	RS-24	1,83	1,84	0,01
	1,94				1,84		
	1,93				1,86		
RS-06	1,84	1,83	0,02	RS-25	1,83	1,84	0,00
	1,79				1,85		
	1,85				1,84		
RS-07	1,92	1,91	0,01	RS-26	1,90	1,88	0,01
	1,92				1,88		
	1,89				1,85		
RS-09	1,92	1,91	0,00	RS-27	1,91	1,91	0,01
	1,91				1,93		
	1,90				1,88		
RS-11	1,87	1,84	0,02	RS-28	1,86	1,87	0,00
	1,84				1,87		
	1,81				1,88		
RS-12	1,84	1,86	0,01	RS-29	1,90	1,89	0,00
	1,87				1,89		
	1,86				1,89		
RS-13	1,86	1,85	0,02	RS-30	1,86	1,87	0,01
	1,87				1,88		
	1,82				1,85		
RS-14	1,86	1,85	0,00	RS-32	1,86	1,87	0,01
	1,86				1,87		
	1,84				1,88		
RS-15	1,86	1,85	0,00	RS-33	1,91	1,90	0,00
	1,86				1,89		
	1,84				1,89		
RS-16	1,89	1,88	0,01	RS-35	1,88	1,88	0,00
	1,86				1,88		
	1,89				1,89		
RS-17	1,87	1,86	0,01	RS-36	1,87	1,86	0,01
	1,85				1,84		
	1,86				1,87		
RS-18	1,88	1,87	0,01	RC-01	1,71	1,73	0,01
	1,87				1,74		
	1,84				1,75		
RS-19	1,89	1,91	0,01	RC-03	1,76	1,77	0,02
	1,92				1,79		
	1,92				1,79		
RS-20	1,80	1,82	0,01	Argila	1,84	1,82	0,01
	1,83				1,81		
	1,83				1,80		

APÊNDICE D – Massa específica real dos corpos de prova cerâmicos

Amostras	MER (%)	Média (%)	Desvio Padrão	Amostras	MER (%)	Média (%)	Desvio Padrão
RS-01	2,38	2,36	0,02	RS-21	2,39	2,49	0,07
	2,37				2,53		
	2,32				2,55		
RS-02	2,47	2,41	0,01	RS-22	2,53	2,56	0,03
	2,47				2,61		
	2,51				2,55		
RS-03	2,44	2,46	0,06	RS-23	2,49	2,47	0,02
	2,39				2,49		
	2,55				2,44		
RS-05	2,53	2,47	0,04	RS-24	2,49	2,61	0,08
	2,42				2,69		
	2,46				2,65		
RS-06	2,58	2,46	0,08	RS-25	2,36	2,42	0,07
	2,38				2,52		
	2,42				2,39		
RS-07	2,45	2,36	0,07	RS-26	2,56	2,49	0,04
	2,28				2,46		
	2,36				2,44		
RS-09	2,65	2,48	0,12	RS-27	2,36	2,40	0,04
	2,35				2,46		
	2,45				2,37		
RS-11	2,42	2,46	0,08	RS-28	2,50	2,51	0,02
	2,58				2,49		
	2,38				2,55		
RS-12	2,42	2,40	0,04	RS-29	2,57	2,55	0,02
	2,33				2,57		
	2,44				2,52		
RS-13	2,48	2,39	0,07	RS-30	2,42	2,47	0,06
	2,38				2,43		
	2,30				2,56		
RS-14	2,50	2,47	0,05	RS-32	2,54	2,54	0,10
	2,39				2,41		
	2,51				2,68		
RS-15	2,53	2,51	0,01	RS-33	2,47	2,48	0,04
	2,49				2,54		
	2,51				2,44		
RS-16	2,46	2,45	0,02	RS-35	2,60	2,58	0,03
	2,46				2,54		
	2,42				2,61		
RS-17	2,46	2,46	0,02	RS-36	2,45	2,47	0,02
	2,43				2,46		
	2,49				2,50		
RS-18	2,49	2,52	0,06	RC-01	2,47	2,44	0,02
	2,46				2,41		
	2,61				2,43		
RS-19	2,56	2,71	0,25	RC-03	2,38	2,50	0,08
	3,07				2,56		
	2,50				2,54		
RS-20	2,37	2,46	0,06	Argila	2,38	2,38	0,00
	2,53				2,36		
	2,49				2,38		

APÊNDICE E – Densidade relativa dos corpos de prova cerâmicos

Amostras	ρ Relativa	Média	Desvio Padrão	Amostras	ρ Relativa	Média	Desvio Padrão
RS-01	0,80	0,81	0,00	RS-21	0,79	0,75	0,02
	0,81				0,73		
	0,82				0,74		
RS-02	0,77	0,77	0,00	RS-22	0,73	0,72	0,00
	0,78				0,71		
	0,77				0,71		
RS-03	0,79	0,78	0,02	RS-23	0,73	0,74	0,01
	0,80				0,73		
	0,74				0,75		
RS-05	0,76	0,78	0,01	RS-24	0,73	0,70	0,02
	0,80				0,68		
	0,78				0,70		
RS-06	0,71	0,74	0,02	RS-25	0,77	0,76	0,01
	0,75				0,73		
	0,76				0,76		
RS-07	0,78	0,80	0,02	RS-26	0,74	0,75	0,00
	0,84				0,76		
	0,80				0,75		
RS-09	0,72	0,77	0,03	RS-27	0,80	0,79	0,01
	0,81				0,78		
	0,77				0,79		
RS-11	0,77	0,74	0,02	RS-28	0,74	0,74	0,00
	0,71				0,75		
	0,76				0,73		
RS-12	0,76	0,77	0,01	RS-29	0,73	0,74	0,00
	0,80				0,73		
	0,76				0,74		
RS-13	0,75	0,77	0,01	RS-30	0,77	0,75	0,02
	0,78				0,77		
	0,79				0,72		
RS-14	0,74	0,75	0,01	RS-32	0,73	0,73	0,02
	0,77				0,77		
	0,73				0,70		
RS-15	0,73	0,73	0,00	RS-33	0,77	0,76	0,01
	0,74				0,74		
	0,73				0,77		
RS-16	0,76	0,76	0,01	RS-35	0,72	0,72	0,00
	0,75				0,74		
	0,78				0,72		
RS-17	0,76	0,75	0,00	RS-36	0,76	0,75	0,00
	0,76				0,74		
	0,74				0,74		
RS-18	0,75	0,74	0,02	RC-01	0,69	0,71	0,01
	0,76				0,72		
	0,70				0,72		
RS-19	0,73	0,71	0,06	RC-03	0,73	0,71	0,01
	0,62				0,69		
	0,76				0,70		
RS-20	0,76	0,74	0,01	Argila	0,77	0,76	0,00
	0,72				0,76		
	0,73				0,75		

ANEXO

ANEXO A – Certificado de participação do projeto CeramicES – Cerâmica sustentável no Sinapse da Inovação

