

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL DE MORAES PRADO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DO CORTE DE
ROCHAS ORNAMENTAIS EM CERÂMICA TRADICIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2021

RAFAEL DE MORAES PRADO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DO CORTE DE
ROCHAS ORNAMENTAIS EM CERÂMICA TRADICIONAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof.^a Dra. Pollyane Márcia de Souto

LONDRINA

2021



TERMO DE APROVAÇÃO

RAFAEL DE MORAES PRADO

ESTUDO DA VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DO CORTE DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM CERÂMICA TRADICIONAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 05 de maio de 2021 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Raphael Euclides Prestes Salem
(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof.^a Dr.^a Délia do Carmo Vieira
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof.^a Dr.^a Pollyane Marcia de Souto
(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof.^a Dr.^a Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

“ A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho não teria se concretizado sem a ajuda de muitas pessoas. Em especial, gostaria de agradecer:

A Deus, por sempre me abençoar com muita saúde, força, coragem e por colocar pessoas incríveis no meu caminho durante essa caminhada.

A professora Dr^a. Pollyane Márcia de Souto pela orientação, pelos conselhos, por todo apoio e toda disposição ao longo deste trabalho e durante a graduação. Além disso, agradeço por todo conhecimento transmitido ao longo desses anos.

Aos meus pais, Haroldo e Renata, por todo amor, carinho, paciência, motivação e apoio incondicional. Por tudo que fizeram para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Minha eterna gratidão.

Aos meus irmãos, Renan e Rauan, pela amizade, motivação, apoio e paciência. Obrigado por sempre estarem ao meu lado.

Aos meus tios, Alessandro e Anderson, pela confiança, apoio e amor que sempre me deram.

Aos meus avós, Antônio e Orlene, e minha tia, Paula, por todo amor e confiança.

A minha namorada, Thilara, por toda paciência, amor, apoio, amizade e companheirismo.

Agradeço aos professores Dr^a. Délia do Carmo Vieira e Dr. Raphael Euclides Prestes Salem pela participação da banca de avaliação, e por todos os ensinamentos compartilhados durante a graduação.

Aos meus amigos que estiveram comigo durante todo esse tempo de faculdade, em especial Guilherme Aguiar e Matheus Candido, pela parceria em todos os anos em que moramos juntos.

Ao técnico Fillipe de Carvalho Bernardino, por toda paciência e ajuda.

A todos os meus professores durante a graduação pela dedicação e conhecimentos compartilhados, além da Universidade Tecnológica Federal do Paraná por me proporcionar essa experiência acadêmica.

RESUMO

PRADO, Rafael M. **Estudo da viabilidade da incorporação de resíduo do corte de rochas ornamentais em cerâmica tradicional**. 2021. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Materiais) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

Durante toda cadeia produtiva de rochas ornamentais são geradas grandes quantidades de resíduos sólidos. As marmorarias, indústrias responsáveis pela produção de peças sob medidas, apresentam uma perda de 20% do volume das chapas processadas na forma de retalhos e 2% na forma de resíduos finos. Deste modo, o presente trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade de aplicação do resíduo fino gerado durante o processamento de chapas de rochas ornamentais, na fabricação de blocos e tijolos cerâmicos estruturais. As amostras de resíduo e da argila foram submetidas a ensaios de caracterização física, estrutural e mineralógica. Foram produzidas amostras com teores de resíduo variando entre 0% e 60% em massa, sob taxa de aquecimento de 5°C/min até 800°C e 3°C/min até 1000°C, sinterizadas em forno mufla na temperatura de 1000°C durante 2 horas. As técnicas de caracterização avaliadas foram: retração linear de secagem e de queima, absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente. Os resultados evidenciaram que não houve prejuízo às propriedades finais como a coloração das peças, porosidade adequada e resistência mecânica, sendo que na formulação com 30% de resíduo obtiveram-se os melhores desempenhos. Os valores de absorção de água para este teor diminuíram cerca de 20% em comparação ao formulado somente com a argila. Para avaliar a influência da temperatura de queima foram confeccionadas amostras com o teor de 30% de resíduo, queimadas sob taxa de aquecimento de 5°C/min até 800°C e 3°C/min até 1100°C, sinterizadas em forno mufla na temperatura de 1100°C durante 2 horas. As técnicas de caracterização avaliadas foram as mesmas utilizadas na primeira parte do trabalho, com acréscimo do ensaio mecânico de flexão a três pontos. Nessa temperatura foi possível verificar o aumento da retração linear de queima e densidade aparente, e a diminuição na absorção de água e porosidade aparente. Tais resultados convergem para um processo de sinterização mais acentuado em comparação com as amostras queimadas a 1000°C. A absorção de água apresentou queda de aproximadamente 32% nas amostras sinterizadas a 1100°C. Os resultados demonstraram que o uso do resíduo apresenta caráter positivo em relação à sua influência nas características da cerâmica vermelha, proporcionando vantagens econômicas para as empresas dos setores de cerâmicas e de rochas ornamentais. Além disso, a viabilidade é reforçada pelos benefícios ao meio ambiente, reduzindo as quantidades de resíduos geradas e seus descartes indevidos.

Palavras-chave: Rochas Ornamentais. Resíduo. Blocos e Tijolos estruturais. Viabilidade.

ABSTRACT

PRADO, Rafael M. **Study of viability of incorporation of residues from the process of cutting ornamental rocks in traditional ceramic.** 2021. 70 f. Monograph (Undergraduate in Materials Engineering) – Academic Department of Materials Engineering, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

Large quantities of solid waste are generated throughout the production chain of ornamental stones. Marble shops, industries responsible for the production of custom-made parts, show a loss of 20% in the volume of sheets processed in the form of scraps and 2% in the form of fine waste. In this way, the present work aimed to study the feasibility of applying the fine residue generated during the processing of ornamental stone sheets, in the manufacture of structural ceramic blocks and bricks. The residue and clay samples were subjected to physical, structural and mineralogical characterization tests. Samples were produced with residue contents varying between 0% and 60% by mass, under a heating rate of 5°C / min up to 800°C and 3°C / min up to 1000°C, sintered in a muffle furnace at a temperature of 1000°C for 2 hours. The evaluated characterization techniques were: drying and firing linear shrinkage, water absorption, apparent porosity and apparent density. The results showed that there was no damage to the final properties such as the coloring of the pieces, adequate porosity and mechanical strength, and in the formulation with 30% of residue the best performances were obtained. The water absorption values for this content decreased by about 20% compared to that formulated with clay alone. To evaluate the influence of the firing temperature, samples were made with a content of 30% of residue, burned at a heating rate of 5°C / min to 800°C and 3°C / min to 1100°C, sintered in a muffle furnace at a temperature of 1100°C for 2 hours. The characterization techniques evaluated were the same as those used in the first part of the work, with the addition of the 3-point flexure strength test. At this temperature, it was possible to verify the increase in the firing linear shrinkage and apparent density, and the decrease in water absorption and apparent porosity. Such results converge to a more pronounced sintering process compared to samples burned at 1000°C. The water absorption showed a decrease of approximately 32% in the samples sintered at 1100°C. The results showed that the use of the residue has a positive character in relation to its influence on the characteristics of red ceramics, providing economic advantages for companies in the sectors of ceramics and ornamental stones. In addition, the viability is reinforced by the benefits to the environment, reducing the amount of waste generated and its improper disposal.

Keywords: Ornamental Rocks. Waste. Structural Blocks and Bricks. Viability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção nacional de cerâmica vermelha	17
Figura 2 – Processo de obtenção de blocos e telha.....	24
Figura 3 – Extrusora na fabricação de blocos	25
Figura 4 – Produto do beneficiamento secundário como matéria-prima para marmoraria.....	33
Figura 5 – Distribuição da produção de rochas ornamentais nos últimos anos	35
Figura 6 – Fluxograma das etapas metodológicas.....	38
Figura 7 – Processo de serragem	39
Figura 8 – Demanda da empresa por rochas ornamentais em função das composições mineralógicas	40
Figura 9 – Esquema do ciclo de queima	43
Figura 10 – Distribuição granulométrica do resíduo	46
Figura 11 – Difratoograma de raios X da argila.....	47
Figura 12 – Difratoograma de raios X do resíduo de rochas ornamentais	48
Figura 13 – Análise termogravimétrica (TGA) do resíduo de rochas ornamentais	49
Figura 14 – Retração linear de secagem e queima dos corpos cerâmicos	50
Figura 15 – Absorção de água e porosidade aparente dos corpos cerâmicos sinterizados a 1000°C	52
Figura 16 – Densidade aparente dos corpos cerâmicos sinterizados a 1000°C	53
Figura 17 – Corpos-de-prova após a sinterização a 1000°C.....	54
Figura 18 – Tensão de ruptura à flexão três pontos dos corpos cerâmicos após a queima de 1100°C.....	57
Figura 19 – Corpos-de-prova após a sinterização a 1100°C.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores limítrofes dos ensaios recomendados para materiais de cerâmica vermelha.....	55
Tabela 2 – Resultados da caracterização física dos corpos cerâmicos queimados a 1000°C e 1100°C.....	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Depósitos de argila para cerâmica vermelha	19
Quadro 2 – Transformações físicas e químicas que ocorrem durante a etapa de queima	26
Quadro 3 – Cronograma das atividades para realização do trabalho no período de 2019 a 2021	70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 JUSTIFICATIVA	15
4 REFENCIAL TEÓRICO	16
4.1 SETOR CERÂMICO	16
4.1.1 Cerâmica vermelha	17
4.1.2 Matérias-primas	18
4.1.2.1 <i>Matérias-primas plásticas</i>	20
4.1.2.2 <i>Matérias-primas não plásticas ou desplastificantes</i>	21
4.1.3 Processo produtivo	23
4.2 MATERIAL PÉTREO	28
4.2.1 Rochas ornamentais e rochas para revestimentos	29
4.2.1.1 <i>Rochas silicáticas (Granitos e similares)</i>	30
4.2.1.2 <i>Rochas carbonáticas (Mármore, Travertinos e Calcários)</i>	31
4.2.2 Cadeia produtiva	31
4.3 USO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM CERÂMICAS TRADICIONAIS	34
5 MATERIAIS E MÉTODOS	37
5.1 MATERIAIS	37
5.2 METODOLOGIA	38
5.2.1 Coleta das matérias-primas	38
5.2.2 Preparação das matérias-primas	40
5.2.3 Análise granulométrica	41
5.2.4 Difração de raios X	41
5.2.5 Análise termogravimétrica	41
5.2.6 Preparação dos corpos-de-prova	42
5.2.7 Queima dos corpos-de-prova	42
5.2.8 Caracterização dos corpos-de-prova após a queima	43
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
6.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	46
6.1.1 Caracterização granulométrica do argila e do resíduo	46

6.1.2 Análise de difração de raios X.....	47
6.1.3 Análise termogravimétrica	49
6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS CERÂMICOS SINTERIZADOS A 1000°C	50
6.2.1 Retração linear	50
6.2.2 Absorção de água e porosidade aparente.....	51
6.2.3 Densidade aparente	53
6.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS CERÂMICOS SINTERIZADOS A 1100°C	55
7 CONCLUSÃO	60
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS.....	63
APÊNDICE A – CRONOGRAMA DE ATIVIDADES.....	70

1 INTRODUÇÃO

O uso e comércio de rochas ornamentais tem grande importância no mercado da construção civil, sendo aplicado em quase todos os projetos. Para se obter o produto final, as rochas passam por uma cadeia produtiva fracionada em lavra, beneficiamento primário e beneficiamento final. Nesses setores produtivos são geradas grandes quantidades de resíduos de granulometria grosseira como casqueiros e aparas, e de granulometria fina e ultrafina na forma de lama (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014). A falta de aplicabilidade desse resíduo gera a sua deposição e descarte em córregos, rios e lagos podendo contaminar reservatórios naturais de águas e causar problemas de assoreamento (MOREIRA; FREIRE; HOLANDA, 2003).

As rochas ornamentais são materiais rochosos que têm seu valor agregado devido à sua aparência estética, sendo amplamente utilizados como elemento decorativo, em trabalho artístico e como material de construção. O termo granito é referente a um conjunto de rochas silicáticas de origem ígnea e metamórfica constituído principalmente por feldspato, quartzo e mica, e seus componentes mineralógicos apresentam variações, que conferem cores e texturas distintas. Apresenta elevada dureza que varia de 6 e 7 na escala Mohs, que se refere à resistência ao risco, e essa variação é decorrente dos teores de feldspato e quartzo na composição. O mármore designa as rochas metamórfica constituída essencialmente por calcita e/ou dolomita. Contudo, comercialmente, é compreendido como qualquer rocha carbonática, tanto de origem sedimentar como metamórfica. O travertino é um exemplo de rocha calcítica pouco ou não metamorfizada que é designada comercialmente como mármore (MELLO, 2006). São exemplos de rochas ornamentais que têm ampla aplicabilidade no setor de construção civil e geram uma quantidade considerável de resíduos durante a sua extração e beneficiamento (SABOYA JUNIOR; XAVIER; ALEXANDRE, 2007).

Os mármore e granitos são amplamente utilizados na construção civil e como elementos decorativos devido aos seus aspectos estéticos e físicos, contudo desde sua extração até o momento em que se encontra na bancada de cozinha ou pias de banheiro, os resíduos gerados durante toda cadeia produtiva representam perdas de matéria-prima que são da ordem de 83% (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014). Na etapa de beneficiamento os resíduos gerados chegam a atingir de 30 a 40% em

volume do bloco serrado, sendo 26% de resíduo muito fino combinado com insumos da serragem e 14% de resíduo grosso na forma de casqueiros a aparas (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014). No setor de beneficiamento de chapas processadas, desempenhada pelas marmorarias, o resíduo produzido representa 2% do volume processado (MELLO, 2004). Com isso, uma alta demanda para que se encontre um método que reduza o impacto gerado ao meio ambiente é cada vez mais evidenciado nos dias atuais. Uma área que o mármore vem ganhando bastante aplicabilidade é a utilização do seu resíduo na produção de concretos, fazendo com que se ocorra a diminuição da exploração de brita, ocasionando um ganho duplo na questão ambiental (HEBHOUB et al., 2011).

As cerâmicas tradicionais utilizam matérias-primas de baixo custo e que tenham elevada ocorrência na natureza como as argilas, os feldspatos, os calcários, além de outros minerais cristalinos inorgânicos não metálicos. Em termos de propriedades apresentam elevada resistência à compressão, elevado ponto de fusão, são bons isolantes térmicos e elétricos e não necessitam de matérias-primas com alto custo. São principalmente aplicadas na construção civil na forma de tijolos, telhas, porcelanas, louças sanitárias e na moldagem cerâmica.

Como foi mencionado, o uso dos resíduos gerados durante a rota produtiva de rochas ornamentais tem criado um grande interesse no estudo pela busca da máxima redução dos impactos gerados no meio ambiente. Devido aos seus constituintes básicos (feldspato, quartzo, mica, calcita e dolomita) e à sua estrutura, eles apresentam características necessárias para serem aplicados em cerâmicas tradicionais, como massa cerâmica para louças, pisos, telhas, blocos ou em cimento como citado anteriormente. Outro fator que colabora para esse preceito é que a granulometria que ele se encontra, se tratando de uma lama com partículas finas podendo conter dimensões inferiores a 0,075 mm (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014), dispensando assim alguns processos de beneficiamento realizados no processo extrativo de materiais mais característicos utilizados.

Sendo assim, o presente estudo aborda a potencial utilização desses resíduos, gerados durante o processo produtivo de rochas ornamentais, em massa cerâmica para fabricação de blocos e tijolos estruturais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade da incorporação de resíduo de pós de rocha (mármore e granitos) à matriz de argila vermelha.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar a influência do teor de resíduo nas propriedades finais dos corpos-de-prova;
- Realizar a caracterização física dos corpos-de-prova com teor de resíduo variando de 0 a 60%;
- Avaliar o efeito da temperatura de sinterização para o teor que melhor representa as funções esperadas para fabricação de blocos e tijolos estruturais;
- Obter corpos-de-prova com resistência igual ou superior aos corpos-de-prova sem adição de resíduos e com boa propriedade de queima.

3 JUSTIFICATIVA

O aumento da população humana e com isso, o aumento da produção de bens e consumo de produtos, vêm desenvolvendo uma área de interesse que é o estudo do aproveitamento racional do resíduo sólido gerado por esse consumo. A falta de cuidado na deposição ou tratamento desses resíduos promoveu danos ao meio ambiente, como problemas de assoreamento, bem como à saúde humana, com problemas de silicose (MOREIRA; FREIRE; HOLANDA, 2003).

Com vista desses problemas, foram criados acordos internacionais e leis ambientais, obrigando as indústrias a terem um maior controle sobre os resíduos sólidos gerados pelas suas atividades. A indústria de rochas ornamentais, juntamente com as mineradoras e a construção civil, iniciaram o interesse de pesquisadores no intuito de correlacionar e determinar a capacidade do uso de resíduos em materiais finais, sem ocasionar perdas nas suas propriedades. A cerâmica tradicional é a mais utilizada para a adição dos resíduos sólidos industriais e urbanos, em virtude das características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e ao elevado volume de produção (MENEZES; NEVE; FERREIRA, 2002).

Os resíduos finos e ultrafinos provenientes da cadeia produtiva de rochas ornamentais são gerados como efluentes no processo de beneficiamento, que é realizado a úmido, sendo a parte líquida composta por água, usada para resfriar a lâmina durante o corte e para evitar a produção de partículas finas (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014). Nas serrarias, as perdas relacionadas a esses resíduos finos chegam a 26% do volume do bloco serrado, enquanto nas marmorarias as perdas representam 2% do volume total da chapa serrada (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014; MELLO, 2004).

O uso desses resíduos na constituição de peças cerâmicas tradicionais tem se mostrado viável em diversos aspectos. Seus constituintes são os mesmos encontrados nas matérias-primas usadas na fabricação de produtos cerâmicos. Com isso, reduz a necessidade de processos extrativos de argilas ao mesmo tempo que o resíduo tem uma destinação final, evitando assim o descarte inadequado. Esses fatores resultam em um ganho ambiental e econômico, visto que a reutilização sem prejudicar suas aplicações agrega valor ao produto final.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

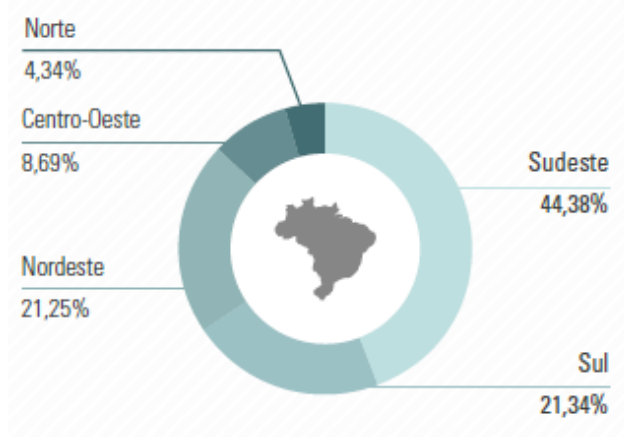
4.1 SETOR CERÂMICO

A indústria cerâmica é responsável pela fabricação de uma vasta gama de produtos por meio de processos e matérias-primas distintas. Esse amplo setor industrial é segmentado em sub-setores em função de aspectos como matéria-prima, propriedades e aplicação (JUNIOR et al, 2019). Uma subdivisão bastante usual é adotada pela Associação Brasileira de Cerâmica – ABC, e baseia-se em critérios técnicos e quanto ao tipo de aplicação, sendo classificada em: Cerâmica Vermelha ou Estrutural; Revestimentos; Cerâmica Branca; Materiais Refratários; Isolantes Térmicos; Fritas e Corantes; Abrasivos; Cerâmica Avançada. As indústrias de vidro, cimento e cal são tratadas como setores à parte da indústria cerâmica devido às suas particularidades tecnológicas e dimensão do mercado (ABCERAM, 2020).

Uma distinção a ser ressaltada entre as indústrias de cerâmicas tradicionais e avançadas referem-se às suas matérias-primas. O insumo utilizado nas cerâmicas tradicionais basicamente são substâncias minerais naturais de base silicática, enquanto as avançadas são fabricadas a partir de matérias-primas sintéticas de alta pureza (JUNIOR et al, 2019). Com isso, as cerâmicas tradicionais apresentam um custo inferior às avançadas devido à abundância de matérias-primas. Como são utilizados em peças que têm maior volume de produção, elas representam como os maiores consumidores de matérias-primas minerais, tendo seus polos nas regiões Sudeste, Sul e Nordeste (MOTTA; ZANARDO; JUNIOR, 2001; REINALDO FILHO; BEZERRA, 2010).

A Figura 1 demonstra a representatividade de cada região em relação à produção de cerâmica tradicional do tipo vermelha.

Figura 1: Produção nacional de cerâmica vermelha



Fonte: SEBRAE (2015).

4.1.1 Cerâmica vermelha

O setor de cerâmica vermelha compreende a produção de elementos empregados na construção civil com coloração avermelhada como tijolos, blocos de vedação e estruturais, elementos vazados, lajes, telhas, tubos cerâmicos, argila expandida, além de materiais de uso doméstico e de adorno. Essa coloração característica é devida à presença de compostos ferrosos que desenvolvem essa tonalidade avermelhada (ABCERAM, 2020).

No cenário atual os segmentos de cerâmicas vermelhas operam em diversos níveis tecnológicos. Uma estimativa aponta a existência de aproximadamente 7400 indústrias no Brasil, compostas em sua maioria por micro, pequeno e médio porte. Na estruturação desse segmento prevalece pequenos empreendimentos familiares, cerâmicas de pequenos e médio porte, caracterizados por uma privação de mecanização e gestão. Tal condição vinculada a uma distribuição heterogênea das pequenas unidades produtivas resultam na deficiência de dados estatísticos de produção e na consolidação de indicadores de desempenho (MME, 2019).

Contudo, nos últimos anos o setor vem sofrendo mudanças construtivas a partir da iniciativa dos próprios empresários, sob liderança da ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica) e de associações estaduais, em parceria com o SEBRAE e SENAI. Foi constatado um aumento de 70% de empresas de blocos cerâmicos qualificadas no Programa Setorial de Qualidade e 57% empreendimentos qualificados de telhas cerâmicas. Além disso, o número de certificações concedidas

pelo OCP (Organismo de Certificação do Produto) do Centro Cerâmico do Brasil registra 55 empresas (MME, 2019).

4.1.2 Matérias-primas

Para o setor de cerâmica vermelha a matéria-prima utilizada são as chamadas massas monocomponentes, compostas basicamente somente por argilas. Estas podem ser definidas de maneira geral como um material de ocorrência natural, apresentam uma textura terrosa, de granulometria fina e após serem umedecidas adquirem plasticidade (SANTOS, 2012). A fração argilosa é constituída por partículas com dimensões inferiores a 2 μm (ABNT, 1995).

As argilas são constituídas predominantemente de argilominerais (filossilicatos). Quimicamente são silicatos de alumínio hidratados, com menor frequência de magnésio e/ou ferro, podendo conter teores de outros elementos alcalinos e alcalino-terrosos. Suas estruturas químicas são formadas na sua grande maioria por folhas tetraédricas (T) de silício e octaédricas (O) de alumínio, podendo ocorrer a substituição do alumínio. Essas estruturas estão agrupadas nas proporções 1:1 (TO) ou 2:1 (TOT). Outros minerais ocorrem junto as partículas dos argilominerais como o quartzo, micas, feldspatos e minerais opacos, geralmente nas frações silte ($2 \mu\text{m} < \phi < 60 \mu\text{m}$) e areia ($60 \mu\text{m} < \phi < 2000 \mu\text{m}$) (LUZ; LINS, 2008; NBR 6502, 1995; GUIMARÃES, 2017).

Os depósitos de argilas utilizadas em cerâmica vermelha são distintos em dois tipos principais. Por se tratar de um material com granulometria fina e por vezes constituído por mais de um tipo de mineral, a sua classificação e identificação causam divergência de terminologia (LUZ; LINS, 2008). No Quadro 1 são apresentados os tipos principais de depósitos.

Nos artigos científicos que abordam sobre a fabricação de alvenaria estrutural, é possível notar que a composição química da argila apresenta similaridade entre si. Isso ocorre porque grande parte das matérias-primas para fabricação de cerâmica vermelha possui argilas com composições similares em termos dos óxidos presentes, não necessariamente nas mesmas proporções. Essas argilas contêm os mesmos componentes principais: sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de cálcio (CaO) (ZACCARON et al, 2019).

Quadro 1: Depósitos de argila para cerâmica vermelha

	Classificação	Contexto Geológico (Ocorrência)	Composição
<u>Argilas Quaternárias</u>	Planície Aluvionar	Fundo dos vales atuais	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Argilas inconsolidadas com contribuição variável de silte e areia ▪ Fração argila: composta de caulinita, com teores variáveis de illita e esmectita ▪ Teor de álcalis: 1 a 2% ▪ Teor de ferro: 4 a 8% ▪ Matéria orgânica: conteúdo apreciável
	Planície Costeira	Planícies costeiras atuais	
<u>Argilas de Bacias Sedimentares</u>		Bacias sedimentares antigas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Taguás – rochas pelíticas fundentes com alteração variável: argilitos, ritmitos, siltitos e folhelhos ▪ Fração argila: predominância de illita, com contribuição de esmectita e camadas mistas (I-E); conteúdo de caulinita concentra-se nos mantos de alteração mais evoluídos ▪ Teor de álcalis: 2 a 7% ▪ Teor de ferro: 5 a 10% ▪ Matéria orgânica: ausente ou em pequenas proporções

Fonte: Adaptado de LUZ; LINS, 2008; JUNIOR et al. (2019).

De forma empírica, busca-se uma massa de composição ideal de plasticidade e fusibilidade, no intuito de garantir trabalhabilidade e resistência mecânica na queima. Seu preparo consiste na mistura de uma argila plástica, composta de argilominerais e característica de alta plasticidade e granulometria fina, juntamente com uma argila arenosa, rica em quartzo e menos plástica, dita redutora de plasticidade (MOTTA; ZANARDO; JUNIOR, 2001).

Os constituintes químicos presentes na massa cerâmica, durante todo o processamento, desencadeiam reações que influenciam as propriedades finais dos produtos cerâmicos. Os componentes que integram a matéria-prima podem ser plásticos (argilas) e não-plásticos, como os fundentes (feldspato), inertes (quartzo) e vitrificantes. Todos exercem funções no decorrer do processo produtivo. Os plásticos são fundamentais na etapa de conformação, enquanto os não-plásticos contribuem

principalmente durante o processamento térmico por meio de transformações físico-químicas (GUIMARÃES, 2017).

4.1.2.1 *Matérias-primas plásticas*

As matérias-primas plásticas são representadas principalmente por algumas argilas, tendo como principal função conferir plasticidade à massa cerâmica e resistência mecânica a verde, tornando a etapa de conformação mais adequada e garantindo maior trabalhabilidade.

O termo plasticidade indica um mecanismo característico do sistema argila-água. Essa propriedade indica a capacidade de deformação, sem rompimento, de um sistema rígido através da aplicação de uma tensão, que após retirada a deformação é mantida. Isso é resultado das forças de atração entre as estruturas das argilas carregadas eletricamente e da ação lubrificante da água que existe entre as partículas (CAMPOS et al, 1999).

Os principais argilominerais que apresentam tal propriedade são a caulinita, illita e esmectita. Basicamente o que difere é o tipo de estrutura e as substituições que podem ocorrer no alumínio por magnésio ou ferro, e no silício por alumínio ou ferro. Essa substituição pode acarretar em uma necessidade de neutralização das cargas residuais geradas, como na argila ilítica, o cátion neutralizante é potássio, e na esmectita pode ser sódio, potássio, cálcio, entre outros (GUIMARÃES, 2017).

A caulinita não apresenta substituição por cátion dentro da sua estrutura cristalina e sua formação ocorre em meio ácido com elevados teores de alumínio e baixos teores de álcalis. Esta pequena quantidade de óxidos fundentes como o Na_2O , K_2O , CaO resultam em uma formação mais lenta e em menor quantidade de fase líquida (GUIMARÃES, 2017).

A interação argila-água constitui um sistema que reflete em uma propriedade inerente às argilas, a retração linear de secagem. Durante o processamento térmico, diferentes retrações ao longo da peça podem ocasionar problemas, como presença de trincas nas peças durante a secagem. A água está presente em todas as massas cerâmicas sob três formas:

- Água de capilaridade ou água livre, também chamada de água de poros, que preenche os poros e vazios mediante a ligação de natureza mecânica;

- Água de plasticidade ou adsorvida, que adere à superfície das partículas coloidais do argilomineral, estabelecendo uma interação físico-química;
- Água de constituição ou absorvida, que se encontra ligada quimicamente aos cristais de argila (ZACCARON et al, 2019; GUIMARÃES, 2017).

Quanto maior o teor de argila plástica na massa cerâmica, maior a necessidade de água para atingir a consistência do processamento, e conseqüentemente maior a contração nas peças durante o tratamento térmico. Uma maneira de facilitar a secagem e evitar defeitos é através da formulação da massa cerâmica com maior quantidade de desplastificante (ZACCARON et al, 2019; QUEIROZ, 2009; SILVA, 2020).

4.1.2.2 Matérias-primas não plásticas ou desplastificantes

As matérias-primas não plásticas desempenham um papel importante ao longo do processamento cerâmico. Quando adicionadas às argilas plásticas, conferem uma redução de plasticidade na massa cerâmica. A presença do desplastificante, que deve apresentar grãos acima de 60 μm , reduz a interação entre a argila e a água, devido à formação de pontos de descontinuidade nas forças de coesão atuantes entre as partículas (SILVA, 2020). Como resultado desse efeito, são produzidos poros que viabilizam a passagem da água do interior até a superfície, permitindo dessa forma uma drenagem adequada das peças durante os processos térmicos, com menores gradientes de umidade (QUEIROZ, 2009; LUZ; LINS, 2008).

Durante o processo de conformação, as matérias-primas não plásticas são responsáveis pela redução de água necessária para atingir a consistência da massa cerâmica. Essa menor quantidade de água contribui posteriormente para a redução de retração das peças e o ciclo de secagem. Além de tudo, os desplastificantes contribuem principalmente na etapa de processamento térmico, os quais controlam as transformações físico-químicas, as deformações e a sinterização. Quando ocorrem reações com as demais matérias-primas, novas fases podem ser formadas (QUEIROZ, 2009; SILVA, 2020).

Os materiais desplastificantes podem ser qualificados como:

- Inertes

São essencialmente a sílica, chamote, cinza natural, cinza volante, escória de alto-forno. Têm a função de diminuir a plasticidade da massa e atuam na redução da retração de secagem e queima.

Os componentes inertes, que apresentam elevados pontos de fusão, permanecem inalterados durante todo o processamento cerâmico, constituindo uma espécie de esqueleto para a massa cerâmica. Tal função proporciona integridade estrutural para as peças fabricadas (QUEIROZ, 2009).

A sílica, componente utilizado para desempenhar a função de vitrificante, pode atuar também como inerte. A quantidade de quartzo livre que irá reagir com os óxidos presentes na massa irá depender da granulometria da partícula e do ciclo de queima utilizado (QUEIROZ, 2009). Para exercer a função de inerte durante a queima, as partículas de quartzo devem apresentar granulometria grossa.

- Fundentes

São utilizados como fundentes os carbonatos e rochas carbonáticas, feldspatos e rochas feldspáticas e os silicatos de metais alcalinos-terrosos. Estes componentes são responsáveis pela fusão das matérias-primas plásticas, na qual baixam a temperatura de formação da fase vítrea e promovem a estabilização das fases amorfas originadas da decomposição desses argilominerais (GUIMARÃES, 2017; MOTTA et al, 2002; ABECERAM, 2020).

Esses materiais são adicionados às massas cerâmicas com a finalidade de favorecer a formação de fase líquida durante a sinterização, proporcionando o preenchimento dos poros e, como resultado, aumentando a resistência mecânica e reduzindo a absorção de água.

O feldspato, característico fundente cerâmico, fornece os óxidos alcalinos (Na_2O e K_2O) necessários para a formação da fase líquida. Esses constituintes reagem com a sílica (Si_2O) formando eutéticos de baixo ponto de fusão (QUEIROZ, 2009).

- Vitrificantes

São compostos basicamente pela sílica (areia quartzosa, quartzo e quartzito). O componente vitrificante é responsável pela formação da fase vítrea com a contribuição do fundente (MOTTA et al, 2002).

Acima de 700°C são desenvolvidas reações químicas da sílica e da alumina com os elementos fundentes, formando aluminossilicatos que são responsáveis pela resistência mecânica, química e pela estabilidade da peça cerâmica (GUIMARÃES, 2017). O líquido formado preenche o espaço entre as partículas não fundidas e a consolidação ocorre principalmente pela penetração do líquido para dentro dos interstícios devido à força da capilaridade.

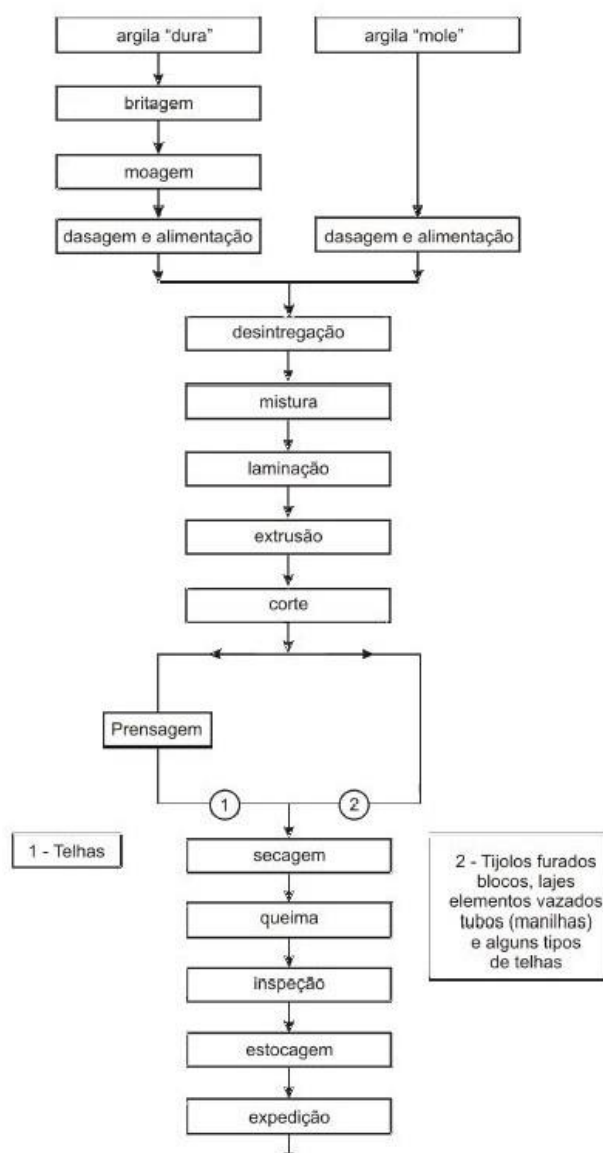
A viscosidade da fase líquida durante a queima pode ser controlada pela dissolução do quartzo residual. A sílica aumenta a viscosidade da fase líquida, aumentando a tenacidade da peça. Isso resulta em um intervalo de queima menos restrito e diminui as chances de deformação durante a queima (QUEIROZ, 2009).

4.1.3 Processo produtivo

A Figura 2 a seguir apresenta um fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha.

O início da cadeia produtiva consiste na extração da argila, realizada a céu aberto de forma manual ou automatizada. Dessa argila extraída é feita a coleta de uma amostra para teste de resíduos a fim de se determinar as características da matéria-prima. Esta etapa é muito importante, pois a partir da análise da amostra é possível identificar problemas futuros que possam ocorrer ao longo do processo até a qualidade do produto final. A argila extraída é armazenada em pequenos lotes e passa por um período de descanso, para garantir o processo de decomposição da matéria orgânica e sais solúveis (QUEIROGA, 2020).

Figura 2 - Processo de obtenção de blocos e telhas



Fonte: ABCERAM (2020).

Após o processo de sazonalização, tem-se o início da preparação da massa. Nesta etapa são misturados diversos tipos de argilas, água e resíduos em dosagens preestabelecidas de acordo com as características requeridas do produto final. A massa é inserida no funil do caixão alimentador que é transportada até o desintegrador, onde são realizados a redução apropriada dos grãos e a homogeneização. Essa massa passa, então, por um moedor/misturador. Nessa mistura é adicionada água na medida correta para que se tenha a plasticidade ideal para o processo de conformação (EPE, 2018).

A etapa seguinte consiste no processo de laminação da massa, com a finalidade de se obter uma massa argilosa mais densa, eliminando bolhas de ar e

aglomerados. Neste estágio do processamento o laminador promove o direcionamento das partículas das argilas. Este processo auxilia na redução de possíveis defeitos nas peças produzidas, como crateras na superfície do extrudado e trincas (REED, 1995; FEAM, 2013).

Logo após a laminação, o produto é transportado para extrusora, conhecida também como maromba, que é a responsável por dar forma à massa. O material plástico coeso é forçado por meio de um pistão ou eixo helicoidal que escoam através do orifício do molde rígido. Este molde possui a forma definida de acordo com o produto a ser produzido. Como resultado, para fabricação de blocos tem-se uma coluna extrusada, como exemplificado na Figura 3 abaixo, ou tarugos para confecção de telhas.

Figura 3: Extrusora na fabricação de blocos



Fonte: EPE (2018).

Depois, o produto extrudado segue para etapa de corte e acabamento. O corte das peças, ainda úmidas, é realizado de acordo com as dimensões adequadas. Posteriormente, as peças cortadas são inspecionadas visualmente, e as peças não conformes e defeituosas são separadas e reaproveitadas no início do processamento, sendo utilizadas na etapa de preparação da massa (EPE, 2018).

As telhas passam pela etapa de estampagem, onde o tarugo cortado é colocado em um molde de acordo com o modelo da telha e compactado. A pressão aplicada pela prensa pode ser de natureza mecânica, hidráulica ou isostática (MACHADO FILHO, 2019).

A próxima etapa para a confecção dos produtos de cerâmica vermelha é o processamento térmico e consiste em duas operações distintas: a secagem e a queima. Ambas as operações são extremamente importantes para a qualidade final do produto.

A secagem pode ser realizada de duas formas. A secagem natural, que aproveita as condições climáticas da região, onde as peças ficam expostas ao ar livre ou em galpões. E a secagem artificial, podendo ser utilizado secador do tipo intermitente, semicontínuo e contínuo. Esta etapa conta com a atenção dos ceramistas, pois é durante esse estágio que as peças podem apresentar defeitos, como o aparecimento de trincas e deformações. Para isso, a saída da água livre deve ser feita de maneira gradual e homogênea com o intuito de garantir a integridade das peças, evitando retrações excessivas e diferenciais (EPE, 2018; GUIMARÃES, 2017).

Após a primeira operação, as peças são encaminhadas para a queima, uma das principais etapas do processo produtivo, sendo nesse estágio o momento em que os produtos adquirem suas propriedades finais através da sinterização (FEAM, 2013). Por meio desse tratamento térmico uma série de transformações físico-químicas podem ocorrer nas peças, como mostrado no Quadro 2:

Quadro 2: Transformações físicas e químicas que ocorrem durante a etapa de queima

Transformações Físicas	
Desidratação	Queda na umidade
Retração	Variação das dimensões da peça
Transformações Alotrópicas	Alteração do arranjo cristalino
Fusão	Mudança do estado S→L
Sinterização	Consolidação de um material não-coesivo
Transformações Químicas	
Decomposição de matéria orgânica	
Decomposição de carbonatos: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	
Formação de novas fases	

Fonte: Adaptado de MACHADO FILHO (2019).

O objetivo desse processo está associado ao desenvolvimento de resistência mecânica, aumento da densidade e decréscimo da taxa de absorção de água por meio

da ação térmica. Com isso, a sinterização consiste em mecanismos de difusão atômica, na qual promove a união da superfície de contato das partículas por coalescência em temperaturas próximas ao ponto de fusão (MACHADO FILHO, 2019).

As peças são submetidas a temperaturas elevadas, em fornos contínuos ou intermitentes, através de fontes energéticas como lenha, resíduos de madeira e gás natural. O uso de resíduos do agronegócio como a casca de arroz e bagaço de cana vem sendo utilizado como estratégia das empresas que buscam a obtenção de certificação (MME, 2019).

O ciclo de sinterização pode ter duração que varia de horas até vários dias dependendo do tipo de produto e da tecnologia empregada, e apresenta três fases:

- Aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada;
- Patamar durante um intervalo de tempo na máxima temperatura de queima;
- Resfriamento até temperaturas inferiores a 200°C (FEAM, 2013).

Da maneira geral, as principais transformações dos argilominerais em função da temperatura estão descritas a seguir:

- Até 150°C: eliminação da água livre não eliminada por completo na secagem;
- 150-250°C: eliminação da água adsorvida;
- 350-650°C: eliminação da água de constituição;
- 400-600°C: decomposição de compostos orgânicos;
- 573°C: rápida transformação do quartzo α em quartzo β ;
- 700-900°C: início da fusão dos álcalis e óxido de ferro;
- 1000°C: início da fusão dos CaO e FeO, com formação de silicatos;
- Até 1200°C: formação da fase vítrea com redução dos tamanhos de poros (QUEIROGA, 2020).

Após a queima, as peças são inspecionadas para identificar possíveis falhas como presença de trincas e peças excessivamente queimadas. As peças liberadas são encaminhadas para serem embaladas, armazenadas e expedidas (FEAM, 2013).

Atualmente muitos trabalhos acadêmicos vêm abordando a viabilidade de incorporação de resíduos na produção cerâmica, como forma de reduzir tanto o impacto ambiental gerado pelo descarte indevido desses resíduos quanto a extração de argilas.

4.2 MATERIAL PÉTREO

Formados por processos naturais, os materiais pétreos ou rochosos são constituídos por agregados consolidados de um ou mais minerais. Além de minerais, as rochas podem conter outros componentes como matéria orgânica, fósseis, vidro vulcânico e outros sólidos naturais (IGC/USP, 2021).

Cada tipo de rocha é identificado com base em sua composição (minerais constituintes), textura (tamanho, forma e arranjo dos minerais em escala submilimétrica a centimétrica) e estrutura (contrastes no arranjo mineralógico e/ou descontinuidades físicas em escala centimétrica a métrica). São subdivididas de acordo com sua formação em 3 grandes subgrupos: ígneas, sedimentares e metamórficas (IGC/USP, 2021).

- i. Rochas ígneas são aquelas resultantes da solidificação de material rochoso parcial a totalmente fundido (magma), localizados no interior da crosta terrestre. Podem ser intrusivas (formadas em ambientes profundos) ou extrusivas (formadas na superfície terrestre). Os granitos são um exemplo de rochas ígneas intrusivas (IGC/USP, 2021; VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).
- ii. Rochas sedimentares são aquelas formadas por sedimentos (seixos, areia, silte e argila) de uma rocha preexistente, ou mesmo de restos orgânicos de origem animal e vegetal, depositados em camadas ao longo do tempo em ambientes terrestres ou aquáticos. Os sedimentos são originados pelo processo de intemperismo (fragmentação/decomposição) e erosão (transporte) de rochas expostas na superfície terrestre, e também pela precipitação de íons em soluções aquosas. Um exemplo de rochas sedimentares são os travertinos, uma variedade de rocha calcária formada pela precipitação química a partir de águas superficiais ou subsuperficiais, ao redor de fontes termais (IGC/USP, 2021; VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).
- iii. Rochas metamórficas são derivadas de outras rochas que, no decorrer do tempo, sofreram a influência de mudanças extremas nas condições de pressão e temperatura. O metamorfismo pode envolver recristalização de

minerais preexistentes, mudança no tamanho e arranjo dos grãos (textura) das rochas e cristalização de novos minerais em virtude de reações dos elementos químicos. Um representante dessa classe de rochas são os mármore, que possuem origem sedimentar carbonática.

4.2.1 Rochas ornamentais e rochas para revestimentos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), nos termos da NBR 15012, define rocha ornamental como material pétreo natural utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração mobiliária e arte funerária. Também define rocha para revestimento como uma rocha ornamental submetida a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizada no revestimento de superfícies, em especial pisos, paredes e fechadas (ABNT, 2013; CHICON, 2019).

A comercialização desses materiais como ornamento ou revestimento são escolhidos em função, principalmente, de suas características estéticas, e em segundo plano das características técnicas e da disponibilidade comercial. Os aspectos estéticos, fator primordial na agregação de valor dessas rochas, resultam na interação de três itens inerentes a suas características petrográficas:

- Cor: depende da composição química dos minerais constituintes e de seu estado de alteração;
- Textura: componente referente ao termo estético, não petrográfico, apesar de ser dependente deste último. É descrita como a distribuição espacial dos minerais que constituem as rochas;
- Granulação: relacionado com o tamanho dos grãos minerais e, em determinados casos, à forma dos cristais ou outros elementos pétreos que compõem a rocha (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

No setor de construção civil, as rochas ornamentais são aplicadas como revestimentos tanto de pisos como paredes, bem como elementos funcionais (tampos de pias, lavatórios e balcões) ou ornamentais (arte estatuária e funerária).

No entanto, a designação comercial das rochas ornamentais e de revestimento é notoriamente ausente de uniformidade e consenso com as normalizações existentes (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014; IGC/USP, 2021). A grande variedade de rochas ornamentais existentes no mercado vinculada com a falta

de informações técnicas resulta no desconhecimento acerca das propriedades desses materiais, podendo comprometer suas aplicações.

Os critérios para a terminologia comercial baseiam-se em duas componentes: a indicação do tipo de rocha e o nome fantasia atribuído à rocha. A primeira traduz a percepção dos produtores/fornecedores sobre a variedade de rocha disponibilizada no mercado. O nome fantasia, primordialmente, referia-se ao local de origem e coloração do material, como por exemplo, Azul Bahia, Branco Ceará, Cinza Mauá, etc. Nos dias atuais, o nome fantasia procura não indicar a procedência do material, como forma do produtor resguardar sua exclusividade, e nem necessariamente faz referência a sua coloração (CHIODI FILHO; CHIODI, 2018).

Nesse contexto, os termos usados para indicação dos tipos de rochas são classificados em três grupamentos litológicos composicionais: o das rochas silicáticas, das rochas carbonáticas e das silicosas. Tais subdivisões não têm conotação com sua origem, porém as rochas carbonáticas e as silicosas são geralmente sedimentares ou metamórficas de origem sedimentar, ao passo que as rochas silicáticas são incluídas em um amplo conjunto de materiais ígneos ou metamórficos de origem ígnea (BASTOS, 2018; CHIODI FILHO; CHIODI, 2018).

4.2.1.1 Rochas silicáticas (Granitos e similares)

As rochas silicáticas são compostas por proporções variáveis de minerais silicáticos (feldspatos, micas, anfibólios, etc) e silicosos (quartzo), ou apenas silicáticos (CHIODI FILHO; CHIODI, 2018).

Os granitos correspondem a esse grande conjunto de rochas silicáticas, cuja associação mineralógica que os compõem apresentam em comum quartzo, feldspatos e micas (biotita e muscovita). Além disso, outros minerais podem estar presentes como anfibólios (hornblenda), piroxênios (hiperstênio) e olivina (CHIODI FILHO; CHIODI, 2018; MELLO, 2006; MELLO; CHIODI FILHO; CHIODI, 2011; BASTOS, 2018).

No setor de rochas ornamentais e de revestimentos, os granitos compreendem as verdadeiras rochas graníticas além de rochas identificadas como tal, abrangendo monzonitos, charnockitos, sienitos, dioritos, diabásios, basalto,

gnaisse, gabros, migmatitos, entre outros (CHIODI FILHO; CHIODI, 2018; MELLO, 2006; MELLO; CHIODI FILHO; CHIODI, 2011; BASTOS, 2018).

4.2.1.2 Rochas carbonáticas (*Mármore, Travertinos e Calcários*)

As rochas carbonáticas são materiais constituídos essencialmente por calcita e/ou dolomita, podendo conter impurezas como argilas, quartzo, micas, anfibólios, matéria orgânica e sulfetos (MELLO; CHIODI FILHO; CHIODI, 2011).

Os mármore correspondem as rochas metamorizadas de calcários e/ou dolomitos, apresentando mais de 50% de calcita e/ou dolomita. Porém, comercialmente, são concebidos como qualquer rocha carbonática, tanto de origem sedimentar como metamórfica (MELLO; CHIODI FILHO; CHIODI, 2011).

Por vezes conhecido como mármore e amplamente utilizado na construção civil, o travertino é uma rocha de origem sedimentar formada por precipitação química de carbonato de cálcio em ambientes de água doce. Esse material pode ser distinto dos mármore e calcários devido a sua estrutura e textura mais heterogênea, geralmente na cor bege e bandeamento irregular (CHIODI FILHO; CHIODI, 2018; MELLO; CHIODI FILHO; CHIODI, 2011; VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

4.2.2 Cadeia produtiva

A cadeia produtiva de rochas ornamentais envolve etapas bem estabelecidas fracionadas em lavra (extração), beneficiamento primário (serragem) e beneficiamento final (resinagem, polimento e corte) (BASTOS, 2018; VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

A primeira operação consiste na atividade extrativa, cujo objetivo é remover o material útil ou economicamente aproveitável dos maciços rochosos ou dos matacões (corpos arredondados de rochas que foram deslocadas do maciço por erosão). Dos maciços rochosos são realizados os cortes primários, para isolar grandes blocos, e os cortes secundários, produzindo blocos de rochas de volumes de 9 a 12 m³, tamanho necessário para ser possível a produção de chapas polidas nas etapas seguintes (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014; ALENCAR, 2013).

O beneficiamento primário, também denominado como desdobramento ou serragem, compreende na preparação e corte dos blocos para a obtenção de chapas de espessura variável, geralmente de dois e três centímetros. No geral, são utilizados equipamentos como teares multilâminas (convencionais) ou teares multifios. Os teares convencionais promovem a serragem dos blocos através de lâminas de aço, gerando resíduos na forma de lama compostos por pó de rocha, cal, água e fragmentos de aço provenientes da granalha e da lâmina. Nos teares multifios são aplicados fios diamantados para corte dos blocos, produzindo resíduos mais limpos na forma de lama comparados aos teares convencionais, composta por água, pó de rocha e micro cristais de diamante (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014; ALENCAR, 2013; CHICON, 2019).

No beneficiamento final ou acabamento, os produtos do desdobramento tomam formas, dimensões e aparência definitivas. Os processos que envolvem esta etapa do ciclo produtivo pelos quais as rochas ornamentais passam são o polimento ou outro tipo de acabamento, o corte e o acabamento final (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014; ALENCAR, 2013; CHICON, 2019; BASTOS, 2018).

Dentre os processos de acabamento superficiais, o polimento configura-se como uma das etapas mais importantes do beneficiamento final. Através desse procedimento, são eliminadas as superfícies rugosas produzidas durante o desdobramento, conferindo brilho às chapas. Outros processos de acabamento também são utilizados em materiais pétreos como o levigamento, flameamento, apicotamento, entre outros. (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014; CHICON, 2019; BASTOS, 2018).

As rochas ornamentais, após passarem por um dos tipos de beneficiamento secundário, podem ter três destinos: venda de peças acabadas, corte da chapa em ladrilhos e como insumo para marmorarias (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014). A Figura 4 mostra o produto do beneficiamento da rocha ornamental como insumo para a indústria de transformação.

As atividades desenvolvidas pelas marmorarias, apesar de exibirem um relativo grau de diversificação em sua linha de produção, destinam a se especializar no atendimento a demanda por rochas ornamentais em produtos específicos, para unidades residenciais individualizadas ou trabalhos com acabamento mais refinado. De maneira geral, esse setor é responsável pela produção de ladrilhos para revestimentos (piso, paredes e escadas), tiras (peitoril, soleira, rodapé, filetes,

rodameio, etc), bancadas (tampos de pia e mesa, balcões) e outras peças sob medida (lápides, divisórias e testeira, nichos, móveis, etc) (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

Figura 4: Produto do beneficiamento secundário como matéria-prima para marmoraria



Fonte: Autoria própria (2021).

Os processos operacionais consistem no recebimento e estocagem das matérias-primas, corte das chapas, furação (por exemplo no caso de tampos de pia), acabamento de bordas (reto, boleado, chanfrado, entre outros), montagem/colagem, controle de qualidade e expedição.

Durante todo o processamento de rochas ornamentais são gerados em quantidade significativas de resíduos grossos (casqueiros e aparas) e finos (pó de rochas). Nesse contexto é importante ressaltar que as marmorarias perdem, em média, 20% do volume das chapas processadas na forma de retalhos. Além disso, durante o processo de recorte, polimento e lustro nesse setor, as perdas giram em torno de 2% na forma de resíduo fino, que juntamente com a água utilizada como meio de resfriamento dos equipamentos, formam uma lama que são depositadas em tanques de decantação (MELLO, 2004).

4.3 USO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM CERÂMICAS TRADICIONAIS

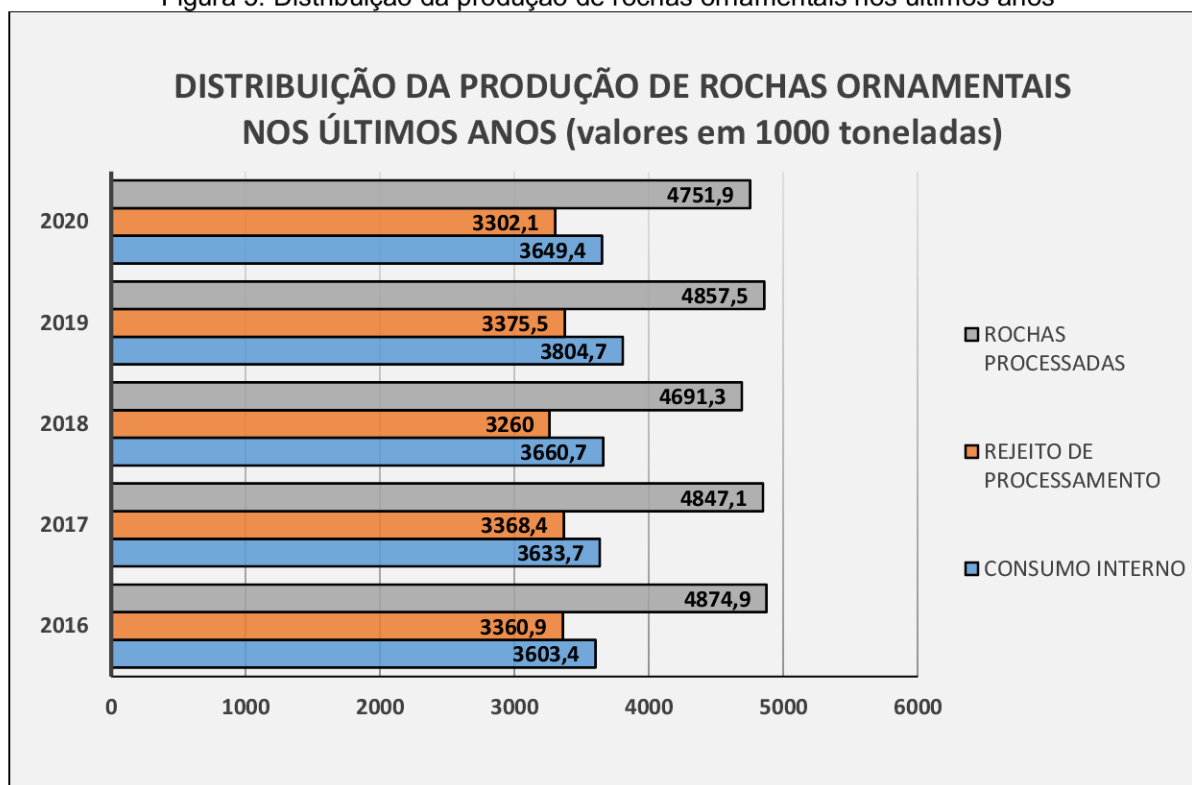
A utilização dos resíduos gerados na cadeia produtiva de rochas ornamentais vem sendo estudada como alternativa para diversos setores industriais. Esses estudos buscam mensurar a viabilidade técnica e econômica de transformar os resíduos finos da serragem em insumos para a indústria cerâmica, a agricultura, indústria cimenteira e de argamassa, setor de polímeros, indústria de vidros, indústria de cosméticos e a própria indústria de rochas ornamentais e de revestimentos (utilização em mosaicos e listelos) (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014; CHICON, 2019).

A interação de fatores como os impactos ambientais causados pelos descartes indevidos e os grandes volumes de resíduos gerados, fizeram com que as empresas se atentassem a essas pesquisas em busca de alternativas altamente rentáveis e sustentáveis (MACHADO FILHO, 2019; LUZ; LINS, 2008).

Montero, et al. (2009) descrevem o impacto ambiental gerado pelo depósito de resíduos de mármore em leitos de rios da Espanha. Durante a estação seca, o pó de mármore era transportado pelo vento e depositado em regiões de atividades agrícolas. Estes resíduos dispostos nos leitos dos rios e nas plantações locais causavam uma diminuição da permeabilidade do solo que resultava em alagamentos. Além disso, as partículas finas eram também responsáveis pela redução da fertilidade do solo, devido ao aumento do pH.

A Figura 5 ilustra a distribuição da produção de rochas ornamentais nos últimos anos e a quantidade de rejeito produzido durante seu processamento (ABIROCHAS, 2018). Os blocos destinados ao beneficiamento compõem as rochas processadas e os rejeitos gerados. Essas rochas beneficiadas, juntamente com a importação de chapas, resultam nas rochas que são disponibilizadas aos mercados interno e externo. É possível notar que a quantidade desses rejeitos por pouco não superam o consumo interno de rochas processadas, evidenciando a quantidade expressiva de resíduos gerados ao longo do processo produtivo.

Figura 5: Distribuição da produção de rochas ornamentais nos últimos anos



Fonte: Autoria própria com dados retirados ABIROCHAS (2021).

A aplicação desses resíduos tem se mostrado viável na indústria de cerâmica vermelha por apresentarem boas proporções dos constituintes como SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , CaO e MgO . Esses componentes quando incorporados à massa cerâmica desempenham o papel dos desplastificantes (fundentes, inertes e vitrificantes), sendo capazes de melhorarem algumas propriedades físicas, como a absorção de água, e mecânicas, como a resistência. Além disso, podem agregar ao produto final maior refratariedade, resistência química e estrutural a altas temperaturas. Tal destinação conduz à diminuição de consumo de matérias-primas naturais, resultando em ganhos ambiental e econômico (SILVA JR; POMPEU; OLIVEIRA, 2020; GIORI, 2018; BILDHAUER et al., 2015).

Oliveira e Andrade (2020) estudaram a viabilidade da adição de resíduos de granito e mármore à massa de argila básica. Como resultado do estudo foi possível concluir que os tijolos incorporados com os resíduos apresentaram valores de absorção de água e de resistência à ruptura capazes de atender as especificações estabelecidas nas normas.

Silva Jr. et al. (2020) avaliaram características tecnológicas como absorção de água, retração linear de queima e tensão de ruptura de amostras incorporadas com

teores de resíduo variando entre 10%, 15% e 20% e sinterizadas a 950°C durante 12 horas. Os resultados mostraram que com o aumento do teor de resíduo, os valores de absorção de água diminuíram. O melhor resultado de resistência mecânica ocorreu no teor de 15%, evidenciando que é uma alternativa sustentável para o setor da construção civil.

Gadioli et al. (2019) examinaram as características microestruturais de produtos cerâmicos, com base nos teores de 0, 10, 20 e 30% de resíduos de granitos, sinterizados a 1050°C e 1200°C. A equipe concluiu que houve uma maior formação de fase líquida na maior temperatura para os produtos formulados com 20 e 30% de resíduo, sendo mais acentuado o fenômeno de vitrificação. Além disso, as cerâmicas sinterizadas apresentaram uma maior densificação e uma redução na porosidade, confirmando a viabilidade do reuso de rochas ornamentais.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados no trabalho foram oriundos de misturas de argila já empregada na indústria de cerâmica vermelha por uma olaria situada no município de Jataizinho - PR e o resíduo de rochas ornamentais foi coletado de uma marmoraria em São Carlos - SP.

Esta mistura de argilas foi caracterizada e estudada por Soken (2015). Sua composição química e TGA indicam alto teor de óxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro, e baixos teores de dióxido de titânio, óxido de potássio e óxido de magnésio. O elevado teor SiO_2 e Al_2O_3 está relacionado com a composição essencial da argila que são os silicatos de alumínio hidratados. O teor de óxido de ferro, responsável pelo efeito fundente e pela cor avermelhada após a queima, apresenta-se em concordância com a literatura, com conteúdo acima de 4% (JUNIOR et al, 2019).

O baixo teor do composto alcalino (K_2O) e ausência do óxido de sódio (Na_2O), que atuam como fundente, fortalecem a ideia do uso do resíduo por serem constituídos, na grande maioria, por quantidades significativas de feldspato. Além disso, é possível afirmar que a argila apresenta características caulínicas, na qual os percentuais dos óxidos fundentes não chegam a 2% (GUIMARÃES, 2017).

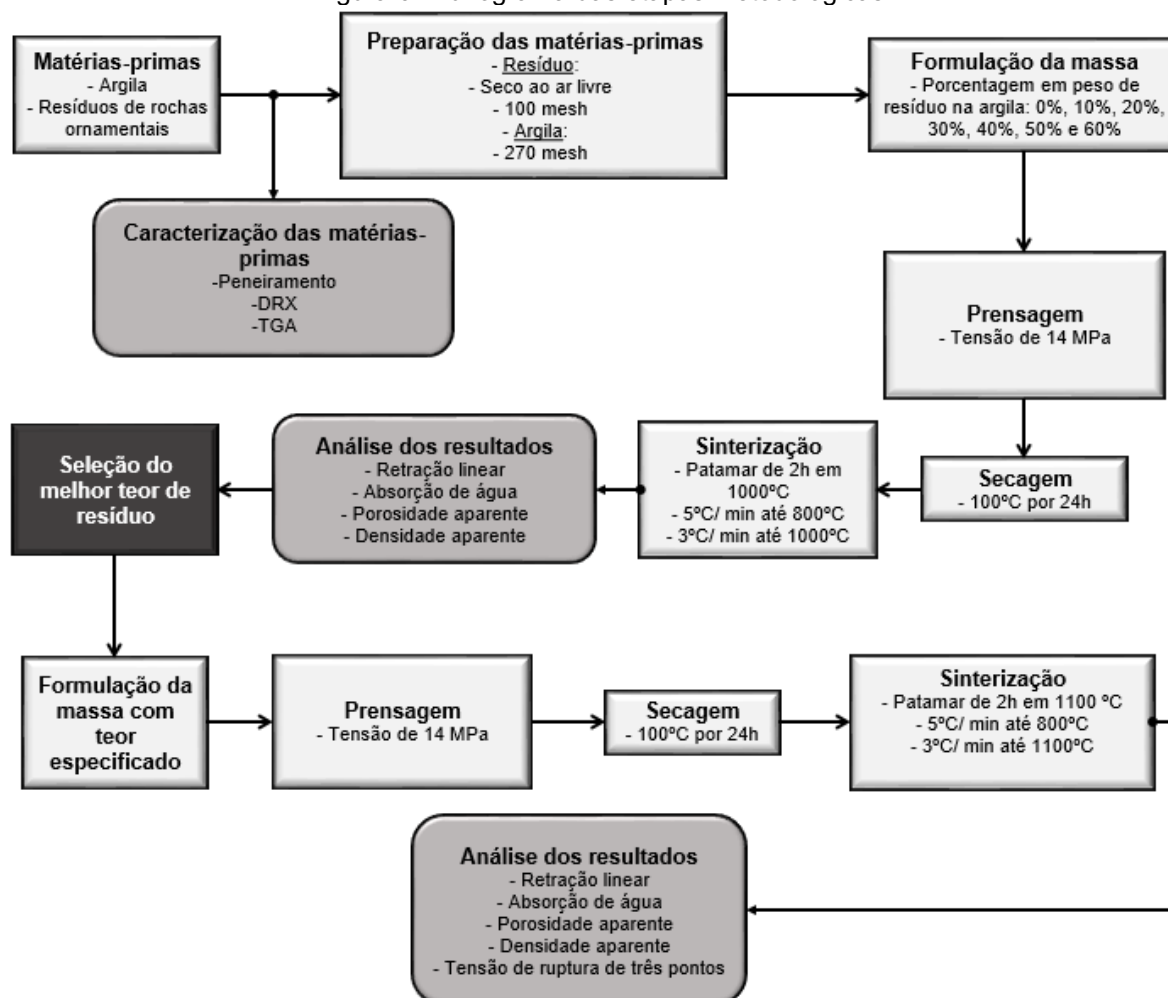
O comportamento térmico da argila mostrou perda de massa entre 100°C e 150°C. Essa perda pode estar relacionada com a eliminação da água livre ou água de capilaridade, que preenche os poros e espaços livres. A segunda perda de massa ocorre na faixa entre 500°C e 600°C, e pode estar associada a desidroxilação da estrutura da caulinita, liberando a água estrutural (hidroxila) (QUEIROZ, 2009; SILVA, 2020; SILVA JR.; POMPEU; OLIVEIRA, 2020).

O resíduo de rochas ornamentais foi estocado em um recipiente fechado e em seguida foi seco ao ar livre. Foi realizada caracterização por peneiramento, difração de raios X e análise termogravimétrica.

5.2 METODOLOGIA

Na Figura 6 é apresentado o fluxograma que descreve as etapas desenvolvidas durante o trabalho para obtenção da cerâmica vermelha incorporada com resíduo.

Figura 6: Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: Autoria própria (2021).

5.2.1 Coleta das matérias-primas

A argila obtida já havia sido beneficiada, apresentando granulometria inferior a 0,053 mm.

O resíduo foi coletado a partir do tanque de armazenamento que estoca o material gerado pelo corte de chapas de rochas ornamentais. Esse corte é realizado por máquinas de serra com disco diamantado, e utilizam água como forma de resfriar

o disco de corte e evitar a emissão de partículas sólidas no ambiente, como mostra a Figura 7. O resíduo, na forma de lama, foi recolhido e acondicionado em um recipiente fechado.

Figura 7: Processo de serragem



Fonte: Autoria própria (2021).

A lama depositada nesse tanque forma camadas de deposição. Como um todo, essa lama não apresenta homogeneidade em sua composição, isso porque as camadas depositadas variam de acordo com a demanda pelos diferentes tipos de rochas ornamentais. Para isso, foi feito um levantamento dos principais materiais serrados durante o período de estocagem dessa lama, a fim de se determinar possíveis constituintes que possam estar presentes na amostra coletada. A Figura 8 apresenta o resultado dessa averiguação:

Figura 8: Demanda da empresa por rochas ornamentais em função das composições mineralógicas

NOMENCLATURA COMERCIAL	COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA
Amarelo Ornamental	Feldspato Alcalino - Microclina (55%); Quartzo (25%), Plagioclásio - Oligoclásio (10%); Granada (5-10%); Biotita (<5%); Traços de Apatita, Zircão, Sillimanita, Espinélio.
Branco Siena	Plagioclásio - Oligoclásio (30%); Quartzo (30%); Feldspato Alcalino – Microclina (27%); Granada (10%); Ortopiroxênio (3%).
Cinza Andorinha	Feldspato alcalino - Microclina (30%); Plagioclásio (30%); Biotita (16%); Quartzo (20%); Titanita (4%).
Cinza Ocre Itabira	Feldspato alcalino – Microclina (45%); Plagioclásio – Albita (20%); Hornblenda (14%); Biotita (7%); Quartzo (5%); Opacos (5%); Titânia (4%).
Preto São Gabriel	Plagioclásio – Andesina/Labradorita (60%); Hiperstênio (15%); Biotita (15%); Hornblenda (5%); Quartzo (5%).
Verde Ubatuba	Plagioclásio – Andesina (30%); Feldspato Alcalino - Microclina (30%); Quartzo (15%); Biotita (13%); Hornblenda (7%); Ortopiroxênio (5%).
Travertino Nacional – Mármore Bege Bahia	Calcita (98%); Quartzo (2%).
Mármore Branco	Calcita/Dolomita (100%).

Fonte: Adaptado de ALENCAR (2013); SARDOU FILHO et al. (2013); MAGALHÃES (2007).

5.2.2 Preparação das matérias-primas

A argila foi passada em peneira Bertel com abertura de 270 *mesh* (abertura de 0,053 mm). O resíduo foi seco ao ar livre e passado inicialmente em peneira com abertura 200 e 270 *mesh* para fazer sua caracterização física. Como observou-se que ele já era muito fino, pois não houve necessidade de moê-lo, passou-se apenas na peneira 100 (abertura de 0,150 mm) para usá-lo na conformação dos corpos-de-prova. Esta etapa foi necessária para realizar a separação dos retalhos oriundos após o processo de serragem, resíduo esse de granulometria grosseira que é descartado separadamente da lama depositada no tanque de decantação. Como a coleta do resíduo fino na forma de lama foi realizado após a operação de serragem, os retalhos não haviam sido separados.

5.2.3 Análise granulométrica

A determinação da distribuição do tamanho de partícula da argila e do resíduo foi realizada pelo método de peneiramento no Laboratório de Cerâmicas (B002) do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais (DAEMA) da UTFPR-LD. Foram utilizadas peneiras Bertel, com aberturas de 200 e 270 *mesh* (0,075 e 0,053 mm respectivamente), com a finalidade de quantificar a massa retida de resíduo e argila nas peneiras.

5.2.4 Difração de raios X

Com a finalidade de identificação das fases presentes foi empregado a técnica de difração de raios X no Laboratório Multiusuário da UTFPR (LabMult-LD) para caracterizar o resíduo. Foi utilizado o equipamento D2 Phaser (Bruker) com radiação característica $K\alpha_{Cu}$ operando a uma tensão de 30 kV e corrente de 10 mA. Além disso, a faixa angular foi de 10-80° em 2θ e a velocidade do goniômetro 0,02°/s.

A análise da argila foi feita no Laboratório de Caracterização Estrutural da Universidade Federal de São Carlos. Foi realizado em um difratômetro Siemens modelo 5100 com radiação $K\alpha_{Cu}$, operando com tensão de 40 kV e corrente de 40 mA e velocidade do goniômetro de aproximadamente 2°/min., variando de 2θ de 10° a 80° (SOKEN, 2015).

Os dados obtidos foram tratados no software livre QualX2 e comparados com a *database* livre POW_COD, elaborada pelos desenvolvedores do software com base na coleção COD (*Crystallography Open Database*).

5.2.5 Análise termogravimétrica

O comportamento térmico do resíduo foi obtido a partir da análise termogravimétrica no Laboratório de Caracterização (B004) do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais (DAEMA) da UTFPR-LD. As análises foram realizadas em um analisador termogravimétrico de modelo TGA-51H (Shimadzu) com taxa de aquecimento de 10 °C/min até 900°C. A argila foi aquecida a uma taxa de 10°C/min até a temperatura de 1000°C e foi exposta por Soken (2015). Através dessa

técnica foi possível estabelecer faixas de temperatura na qual ocorreram a decomposição do carbonato e a reação de desidratação.

5.2.6 Preparação dos corpos-de-prova

Para a preparação da mistura cerâmica, o resíduo foi incorporado à argila na proporção em peso de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60%. A homogeneização foi realizada por meio de um moinho de jarros de modelo SL-34/3-DT – Solab com velocidade constante de 150 rpm durante 15 minutos. Em seguida cada formulação foi separada, armazenada em sacos plásticos e identificadas como R0, R10, R20, R30, R40, R50 e R60 respectivamente.

A etapa seguinte de preparação consistiu em adicionar 10% de água para cada teor de resíduo/argila com a finalidade de promover uma melhor compactação durante a etapa de prensagem. O moinho de jarros foi utilizado novamente durante 5 minutos para promover uma maior homogeneização das misturas umedecidas. Cada mistura foi passada em peneira com abertura de 20 *mesh* (0,850 mm) para promover a granulação da massa.

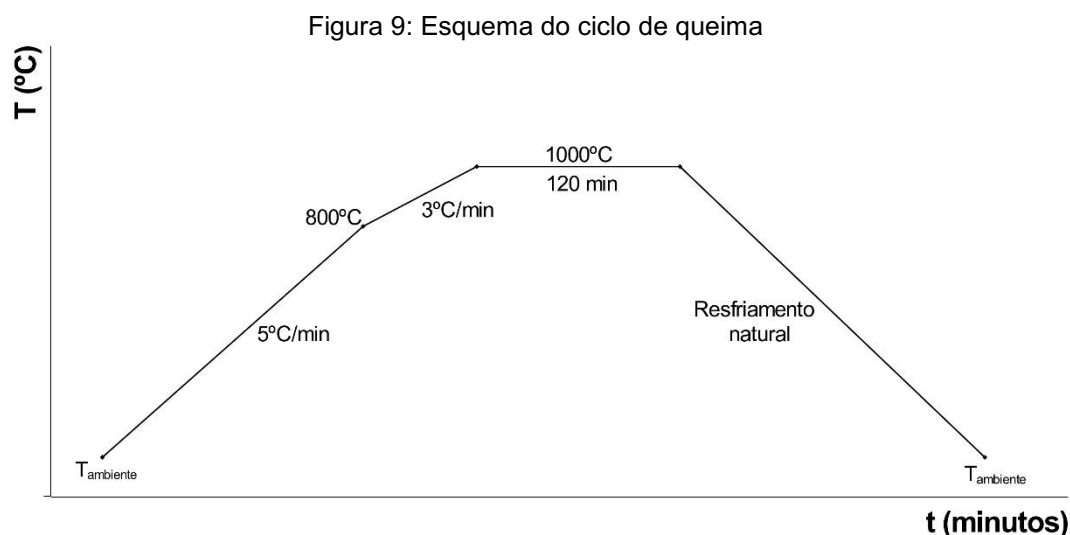
Com a finalidade de se obter os corpos-de-prova, a fase subsequente consistiu na prensagem uniaxial. Durante esta operação foi utilizado uma pré-carga de 3,5 MPa durante 30 segundos seguido de uma carga de 14 MPa por 60 segundos. Foi empregado um molde metálico retangular com dimensões aproximadas de 70 mm de comprimento e 20 mm de largura. No total foram produzidos 35 corpos-de-prova, sendo 5 para cada formulação (5 amostras para 0% resíduo/ 100% argila, 5 amostras para 10% resíduo/ 90% argila, e assim sucessivamente).

Na segunda etapa do trabalho, após a conclusão de qual teor apresentou melhor desempenho, o processo de preparação dos corpos-de-prova foi repetido para o teor selecionado. No total foram confeccionados 9 corpos-de-prova.

5.2.7 Queima dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram queimados em forno mufla modelo ML 1300 – Fortelab, com rampa de aquecimento de 5°C/min até 800°C, uma nova taxa de aquecimento de 3°C/min até a temperatura de queima a 1000°C, com um patamar de 120 minutos. Essa temperatura foi selecionada por ser próxima às usadas na

indústria. O resfriamento foi realizado de forma natural. O ciclo de queima é apresentado a seguir na Figura 9.



Fonte: Autoria própria (2020).

Após a queima dos corpos-de-prova, as amostras foram identificadas de 1 a 35 e separadas de acordo com o respectivo teor de resíduo. Por exemplo, a formulação R60 (60% resíduo + 40% argila) contempla as amostras de 31 a 35.

Com o objetivo de avaliar a influência da temperatura de sinterização nas características finais das amostras, foram sinterizados os corpos-de-prova confeccionados com teor específico de resíduo. Os corpos-de-prova produzidos, foram aquecidos a $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até 800°C , seguido de um aquecimento até 1100°C a $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ com patamar de 120 minutos. Após a queima os corpos-de-prova foram identificados de 1x a 9x.

As caracterizações físicas e mecânicas dos corpos-de-prova que foram empregadas após a queima são descritas a seguir.

5.2.8 Caracterização dos corpos-de-prova após a queima

A determinação do teor de resíduo incorporado na argila que obteve melhor desempenho e a influência da temperatura de sinterização nas propriedades finais dos corpos-de-prova foram obtidas por meio das caracterizações descritas abaixo.

Os corpos-de-prova foram caracterizados por retração linear de secagem e queima seguindo a adaptação da norma ASTM C326-09 (ASTM, 2018). Além disso,

a absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente foram determinadas de acordo com a adaptação da norma ASTM C373-14a (ASTM, 2014).

A caracterização mecânica das amostras foi feita por meio da tensão de ruptura à flexão, segundo a adaptação da norma ASTM C1161 (ASTM, 2013). Foi utilizado a máquina universal de ensaio WDW-100E (Time Group) do Laboratório de Ensaio do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais (DAEMA) da UTFPR-LD. O afastamento entre os apoios foi de 50 mm e a velocidade de aplicação de carga de 0,5 mm/min.

As equações apresentadas a seguir foram utilizadas para os cálculos das caracterizações físicas e mecânicas expostas anteriormente.

- Retração linear

Para a determinação da retração linear de secagem e queima, os corpos-de-prova foram medidos com um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm da marca Insize. Por meio da expressão a seguir a retração linear foi determinada:

$$R (\%) = [(L_0 - L_f)/L_0] * 100 \quad (1)$$

Para a retração linear de secagem, L_0 é o comprimento após a prensagem corpo-de-prova e L_f o comprimento do corpo-de-prova após a secagem na estufa. A retração linear de queima é expressa por L_0 , que é o comprimento após a secagem, e por L_f , que é o comprimento após a queima das amostras.

- Absorção de água

A absorção de água foi expressa de acordo com a expressão a seguir:

$$AA (\%) = [(M_u - M_s)/M_s] * 100 \quad (2)$$

Onde M_u é a massa do corpo-de-prova úmido e M_s é a massa do corpo-de-prova seco.

- Porosidade aparente

$$PA (\%) = [(M_u - M_s)/(M_u - M_i)] * 100 \quad (3)$$

Onde M_i é a massa do corpo-de-prova imerso em água.

- Densidade aparente

$$DA (g/cm^3) = [M_s/(M_u - M_i)] * 100 * \rho_{\text{água}} \quad (4)$$

Onde $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água.

- Tensão de ruptura a flexão (TRF) três pontos

$$TRF (MPa) = 3PL/2bh^2 \quad (5)$$

Em que P é a carga no momento da ruptura (N), L é a distância entre os apoios (mm), b a largura do corpo-de-prova (mm) e h a altura do corpo-de-prova (mm).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

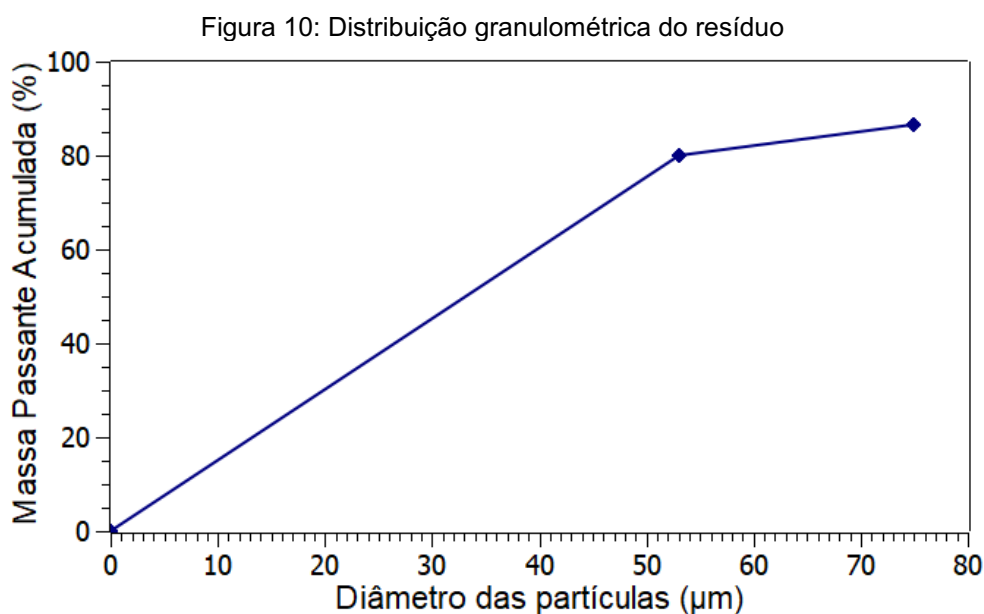
6.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Para a caracterização da argila e do resíduo foram feitas a distribuição granulométrica por técnicas de peneiramento e análise de difração de raios X. A análise termogravimétrica foi realizada somente para o resíduo. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

6.1.1 Caracterização granulométrica da argila e do resíduo

A argila apresentou na sua totalidade partículas com diâmetro inferior a 53 μm . Por esse motivo não será apresentado gráfico de distribuição granulométrica para a argila visto que toda a massa passou pela peneira de 270 *mesh*. Essas partículas de granulometria fina para uso de cerâmica tradicional, podem contribuir para uma maior compactação e propiciar a reatividade entre os componentes durante a queima. Isto está relacionado com as elevadas superfícies específicas que promovem uma maior sinterabilidade (GUIMARÃES, 2017).

A distribuição granulométrica do resíduo é representada na Figura 10:



Fonte: Autoria própria (2021).

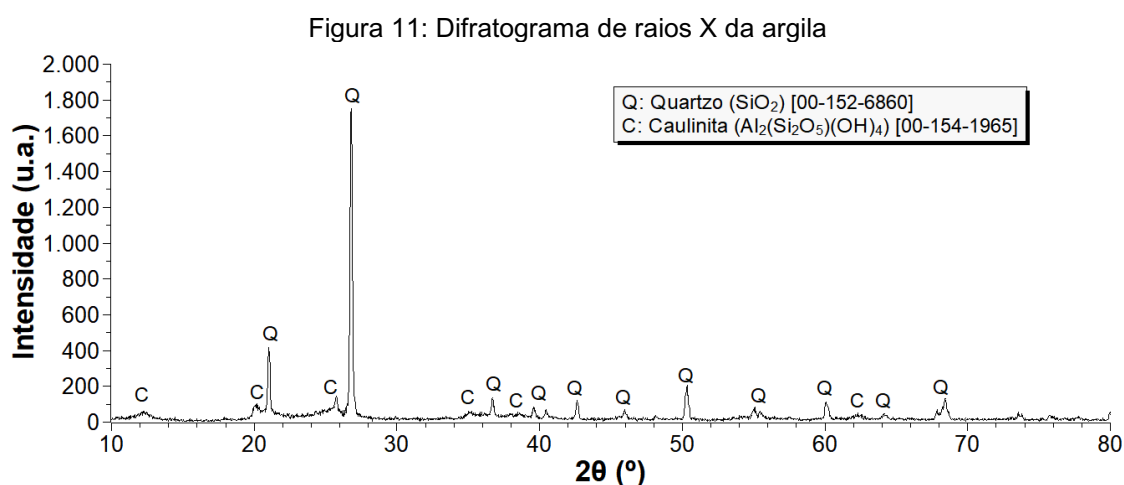
Como mostrado acima, os resíduos apresentam em grande parte granulação fina e uniforme, com tamanho médio de partícula (D50) de 33 μm . Além disso, 80% das suas partículas possuem diâmetro inferior a 53 μm . Esta granulometria na qual se encontram decorre do processo de corte que produz particulados finos. Em vista disso, esses materiais não necessitam de redução do tamanho de partículas para serem incorporados a massa cerâmica, o que resultaria em economia de energia para a indústria.

Ademais, parte do resíduo contém partículas com fração granulométrica de silte e areia, na qual 20% das partículas apresentam diâmetros superiores a 53 μm . Esse tamanho de partícula é interessante para o desempenho da função desplastificante da massa cerâmica, além de colaborar para a integridade estrutural da peça sinterizada.

6.1.2 Análise de difração de raios X

A técnica de difração de raios X foi aplicada com a finalidade de identificar as fases presentes tanto na argila como no resíduo de rochas ornamentais.

Nas Figura 11 e 12 são apresentados os difratogramas da argila e do resíduo.

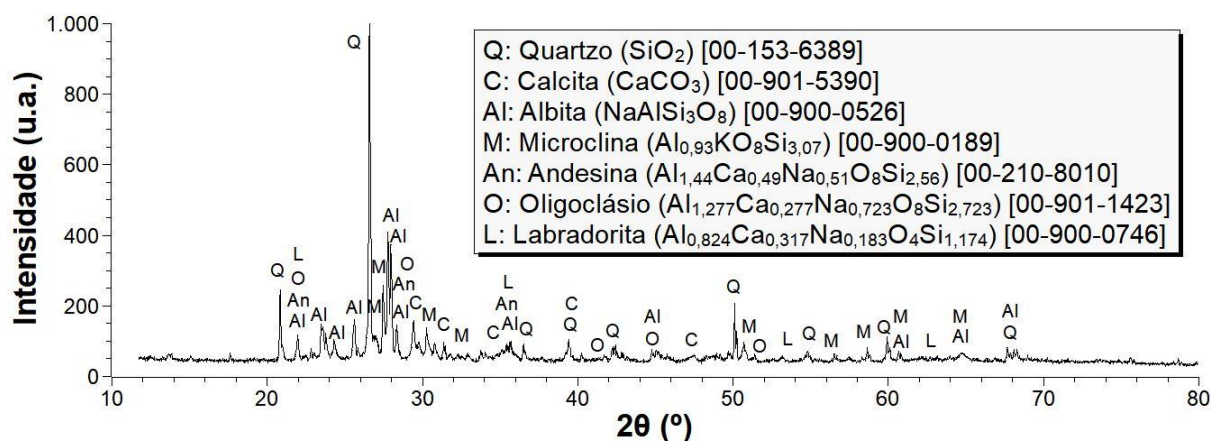


Fonte: Autoria própria (2021).

A identificação das fases cristalinas presentes na argila apontou a presença do quartzo e da caulinita. A presença do óxido de silício e do óxido de alumínio foi comprovada pela análise de fluorescência de raios X (SOKEN, 2015), na qual o teor

de óxido de silício refere-se a sílica livre (quartzo) e ao silicato que compõem a estrutura da argila caulínica.

Figura 12: Difratograma de raios X do resíduo de rochas ornamentais



Fonte: Autoria própria (2021).

A identificação das fases do resíduo demonstra um caráter favorável à incorporação na massa cerâmica. O difratograma indicou a presença das seguintes fases cristalinas: quartzo, calcita, albita, microclina, andesina, oligoclásio e labradorita.

A partir da caracterização granulométrica do resíduo vinculada com o resultado da análise de difração de raios X apresentado acima, é possível afirmar que o quartzo tem maior tendência de atuar como vitrificante, em virtude da maior fração granulométrica fina na qual se encontra (80% das partículas com dimensão inferior à 53 μm). Durante a queima, a fração mais fina do quartzo pode reagir com os óxidos fundentes, auxiliando a formação da fase líquida. A função da fase vítrea garante a ligação das fases cristalinas formadas e aumenta a resistência da peça por meio da diminuição da fase porosa. A fração de partícula mais grosseira pode conferir ao quartzo a função de inerte, garantindo a integridade estrutural da peça durante a queima. Essa característica contribui para o controle de retração de secagem e queima (GIORI, 2018; MOTTA et al, 2002; QUEIROZ, 2009).

As fases cristalinas albita, microclina, andesina, oligoclásio e labradorita identificam a presença do grupo do feldspato, principal fundente utilizado na cerâmica. O feldspato é responsável por fornecer os óxidos alcalinos (Na_2O e K_2O) necessários para promover a fusão dos componentes plásticos e formar a fase vítrea. Para a indústria cerâmica as de maior importância são os potássicos e sódicos. Na identificação foi possível observar a presença dos dois tipos, o feldspato potássico

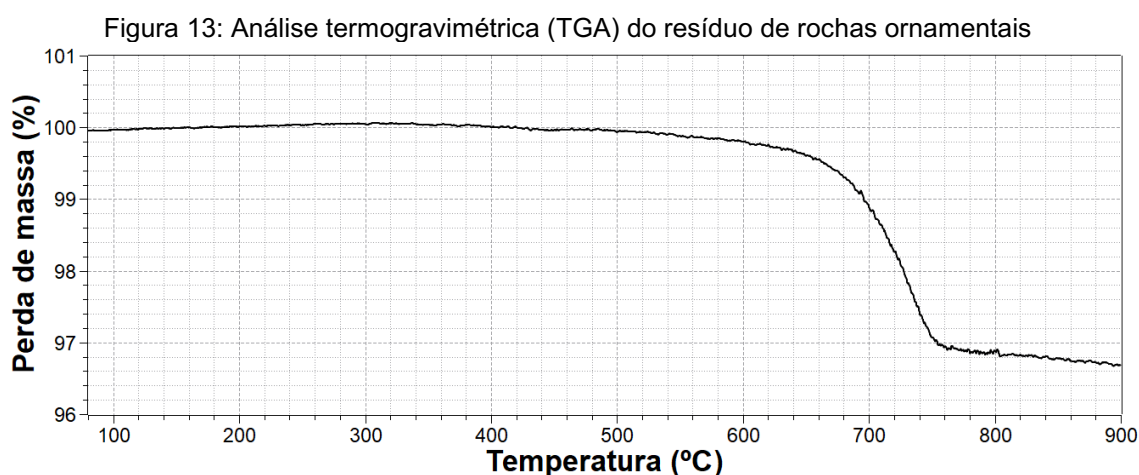
representado pela microclina, e o sódico composto pela albita, andesina, oligoclásio e labradorita (MOTTA et al, 2002; ABCERAM, 2021).

A calcita, constituinte majoritário das rochas carbonáticas como o travertino, atua de modo geral na ajustagem da porosidade da peça. Em grandes proporções reduzem a resistência mecânica devido a alta liberação de CO₂ durante a dissociação do carbonato proporcionando elevada porosidade, entretanto, em pequenas quantidades, atuam como fundentes. Além disso, após a calcinação o óxido de cálcio tende a formar novas fases com a sílica ou alumina ou a fase vítrea. Essas reações apresentam expansão durante a queima, que resultam em baixas contrações lineares de queima (SOTÉRIO; MELCHIADES; BOSCHI, 1999; GUILMARÃES, 2017; ABCERAM, 2021).

Esses minerais identificados apresentam concordância com o levantamento de dados feito das principais rochas serradas durante o período de coleta da amostra, como mostrado na Figura 8. Além do mais, esses resultados colaboram para a ideia funcional da utilização desse resíduo visto que seus componentes apresentam características de materiais desplastificantes.

6.1.3 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica do resíduo de rochas ornamentais é apresentada na Figura 13 a seguir:



Fonte: Autoria própria (2021).

Na curva TGA do resíduo apresentada acima, é possível verificar uma perda de massa de aproximadamente 3% entre 500 e 900°C. Esta perda está relacionada

com a decomposição do carbonato de cálcio presente no resíduo como mostrado na difração de raios X exposta na Figura 13. A calcita está presente majoritariamente na composição mineralógica do Mármore Branco e do Mármore Bege Bahia (Travertino Nacional) (COLETI et al, 2014; SALES, 2012; ALMEIDA et al, 2019).

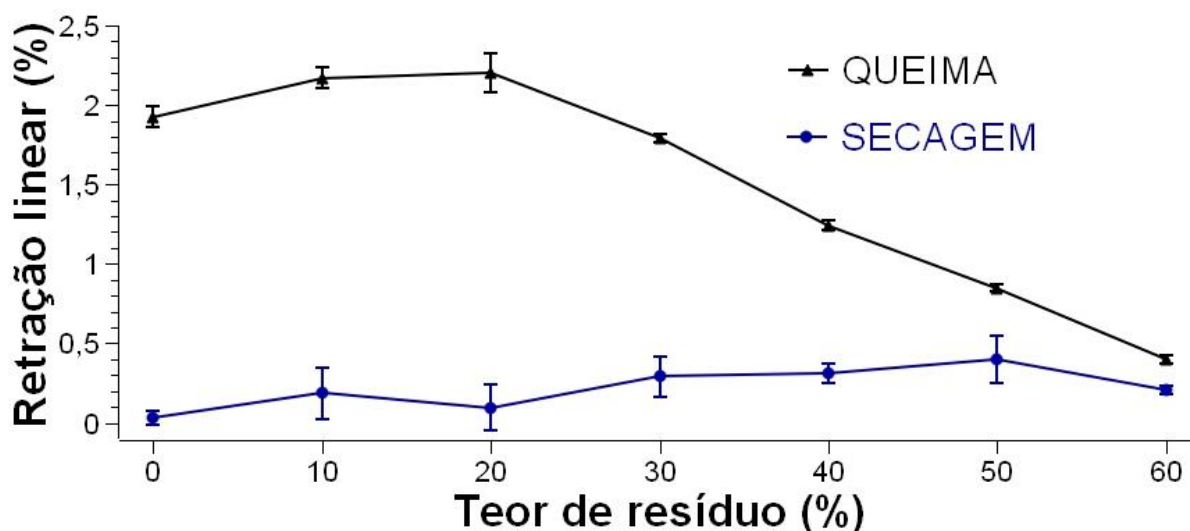
6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS CERÂMICOS SINTERIZADOS A 1000°C

Os resultados a seguir são referentes aos corpos-de-prova feitos com o teor variando de 0 a 60% de resíduo identificados de 1 a 35, após a sinterização a 1000 °C.

6.2.1 Retração linear

A retração linear de secagem e queima dos corpos-de-prova é apresentada a seguir:

Figura 14: Retração linear de secagem e queima dos corpos cerâmicos



Fonte: Autoria própria (2021).

Os resultados para retração linear de secagem apresentaram o aumento com a adição do resíduo. Porém esses valores foram muito pequenos, abaixo de 1% em todas as composições, demonstrando insignificante influência da etapa de secagem na deformação dos corpos cerâmicos, visto que o teor de umidade adicionado à massa não variou.

Na retração linear de queima (RLQ), exposta acima, observa-se que os corpos-de-prova formulados com 10 e 20% apresentaram um aumento de aproximadamente 13% na RLQ em relação ao constituído somente com a argila (R0). Isto pode estar relacionado com a presença da calcita no resíduo, que em conjunto do feldspato, exercem a função de fundentes resultando no pequeno acréscimo na contração das peças.

Com o aumento do teor de resíduo é possível dizer que há tendência de redução da retração linear de queima conferindo a peça maior estabilidade dimensional, o que pode reduzir os defeitos como a presença de trincas. Nota-se que com o aumento do teor de resíduo, conseqüentemente de calcita e feldspato, a contração causada pela fase líquida é balanceada pelos efeitos expansivos ocasionado pela dissociação da calcita através da liberação de gases e pela possível formação de novas fases (SOTÉRIO; MELCHIADES; BOSCHI, 1999).

Além disso, essa tendência na redução da retração linear de queima está associada ao quartzo de granulometria mais grosseira presente no resíduo (20% das partículas com dimensão superior à 53 μm), que atua como material inerte, controlando a contração da peça e estabelecendo maior estabilidade dimensional.

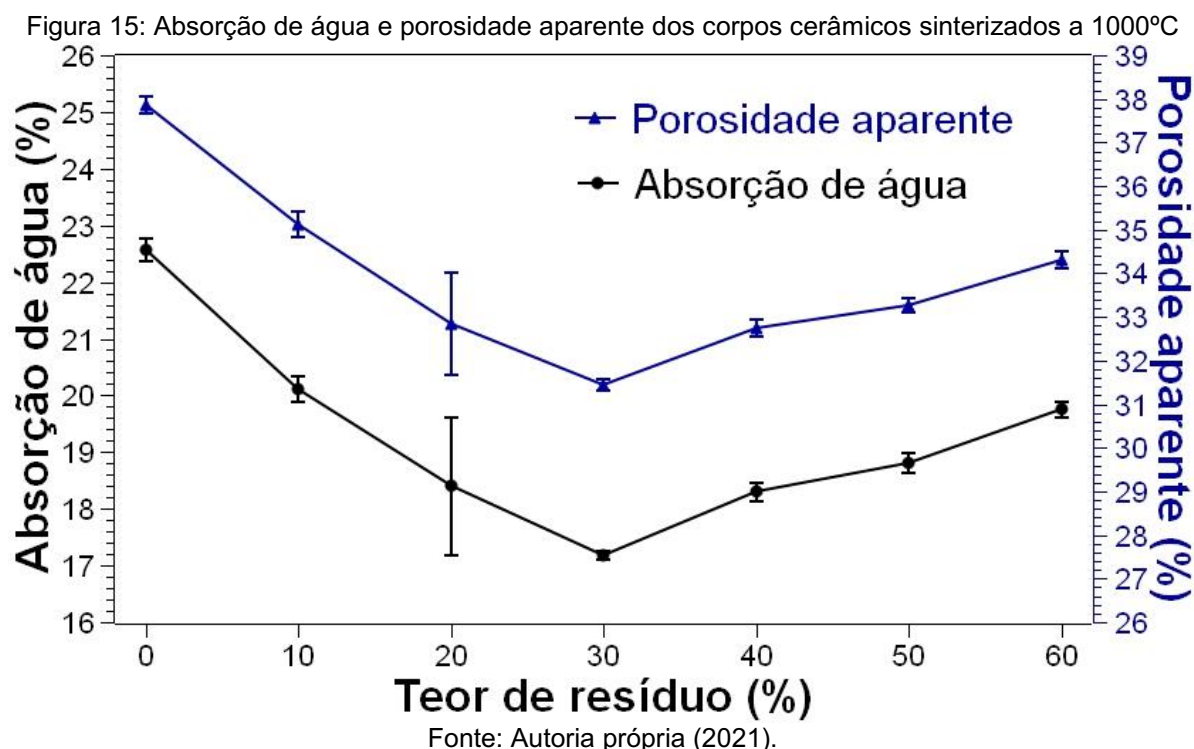
6.2.2 Absorção de água e porosidade aparente

O índice de absorção de água é um parâmetro muito importante dos produtos cerâmicos e é um indicador de qualidade. Esse índice representa a proporção que o material cerâmico é capaz de absorver água em relação à sua massa. Valores de absorção de água que divergem do especificado pela norma podem ser prejudiciais à sua funcionalidade. A exemplo disso, altos valores de absorção de água para tijolos maciços prejudicam o processo de hidratação da argamassa quando em contato com o tijolo durante o assentamento (OLIVEIRA; ANDRADE, 2020). Para isso, a norma NBR15270-2 estabelece valores admissíveis que deve ficar acima de 8% e abaixo de 25%, a fim de garantir a trabalhabilidade de assentamento e a hidratação correta do cimento (NBR15270-2, 2017).

A porosidade aparente fornece o percentual de poros abertos e fechados (porosidade inicial do compactado), após a sinterização, das amostras em comparação com seu volume total. Essa porosidade aberta é produzida

principalmente pela perda de massa pelos processos de desidratação e desidroxilação (SOARES et al, 2016).

A Figura 15 mostra os valores obtidos para a absorção de água e porosidade aparente, onde o comportamento da porosidade em função do teor de resíduo apresenta comportamento similar à absorção de água, que é um bom indicativo da porosidade aberta.



Em geral, todas as amostras apresentaram menor absorção de água em relação a R0 (formulada somente com argila), com valores inferiores a 20%. O melhor resultado foi para o grupo R30 que apresentou índice de absorção de aproximadamente 17%, com queda de 22 pontos percentuais se comparado com R0. A partir desses valores, é possível afirmar que a adição de resíduo não modifica as características dos produtos com relação à capacidade de absorção de água, além de estarem em concordância com os valores especificados pela norma NBR 15270-2.

Os componentes fundentes presentes no resíduo promoveram uma maior formação de fase líquida durante a sinterização, resultando no preenchimento dos poros. Isso resultou na redução da absorção de água nos corpos-de-prova em comparação com R0.

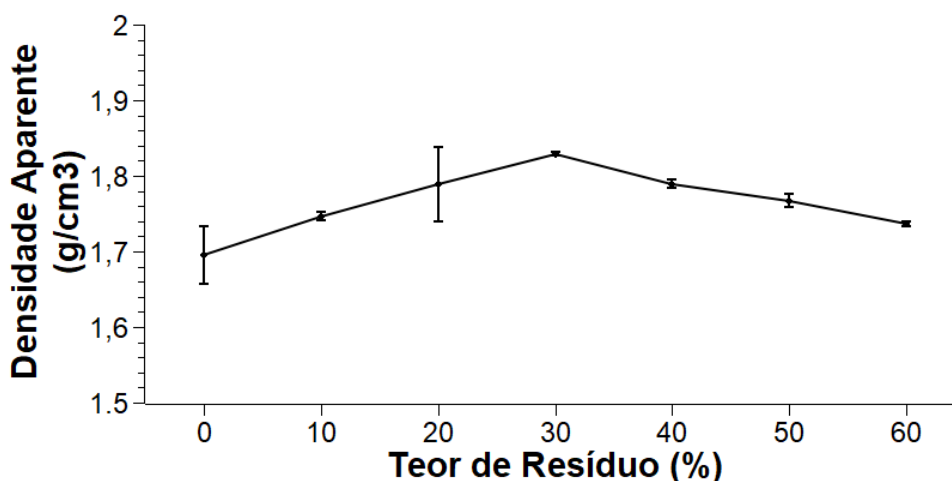
A incorporação de resíduo na argila promoveu a diminuição na porosidade das peças, mostrando-se mais expressivo na formulação com 30%. Nesse teor, a

porosidade foi reduzida aproximadamente 15% em relação ao encontrado para as amostras R0. Essa queda está relacionada com o balanceamento entre os fundentes e o carbonato de cálcio, na qual nessa formulação foi possível obter a menor absorção de água, em consequência da diminuição da porosidade aberta. O aumento da porosidade das amostras de R30 para R60 foi de 8%, e está vinculado com o aumento do teor de calcita na massa cerâmica. Consequentemente uma maior quantidade de CO_2 é eliminado durante a sinterização, aumentando os canais abertos (SOARES et al, 2016).

6.2.3 Densidade aparente

A densidade aparente dos corpos cerâmicos está apresentada na Figura 16. Juntamente com a absorção de água e porosidade aparente, o fator densidade aparente apresenta relação direta com o grau de vitrificação e temperatura de sinterização (SILVA, 2020).

Figura 16: Densidade aparente dos corpos cerâmicos sinterizados a 1000°C



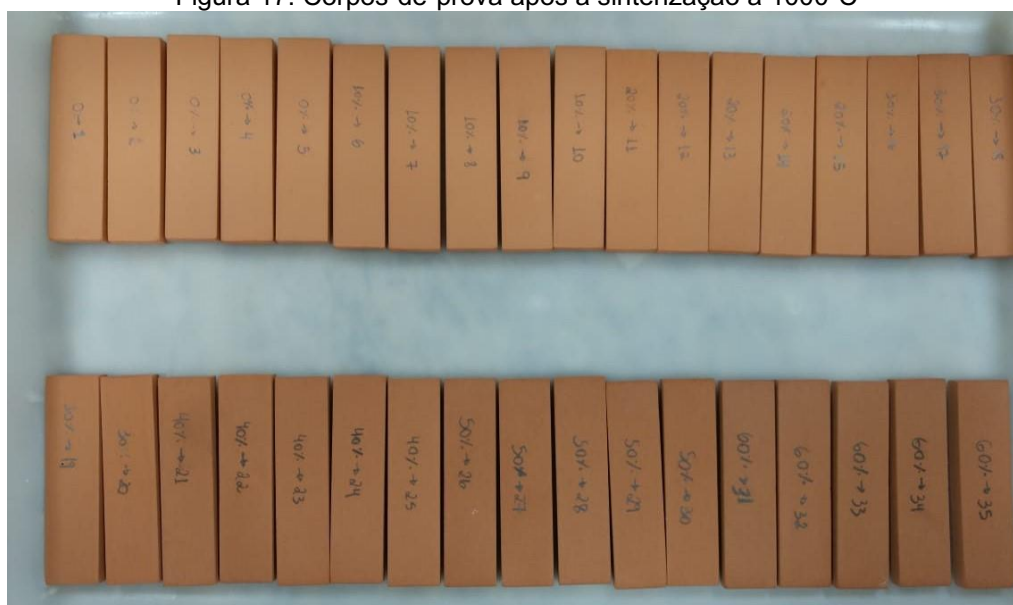
Fonte: Autoria própria (2021).

O uso de resíduo acarretou no aumento da densidade aparente em todos os teores comparados com R0, que apresentou densidade aparente de $1,7\text{g/cm}^3$. O melhor resultado foi observado em R30 com aumento na densidade em torno de 8%. Nessa composição foi possível obter o menor valor de porosidade isolada nos corpos cerâmicos, resultando na maior densificação. Consequentemente pode-se inferir que a vitrificação ocorreu de forma mais pronunciada nesse teor.

Nesse sentido, é possível verificar que na formulação R30 o componente vitrificante com a contribuição dos fundentes, presentes no resíduo, permitiram a formação da fase vítrea de maneira mais acentuada, reduzindo a porosidade isolada. O aumento do teor de resíduo, acima de 30%, resulta em maiores quantidades de calcita, o que proporciona a formação de poros com a liberação de CO₂. A vitrificação ocorre, porém aumenta-se a quantidade de porosidade residual isolada.

A partir da caracterização dos corpos-de-prova, foi possível concluir que o uso do resíduo apresenta caráter positivo em relação a sua influência nas características finais da cerâmica vermelha, como retração linear, absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente. Além disso, o aspecto estético relacionada à coloração das peças apresentou-se avermelhada, com aumento da tonalidade escura para maiores teores de resíduos, como pode ser observado na Figura 17. Logo, essa característica visual foi alcançada conforme o esperado para material cerâmico vermelho.

Figura 17: Corpos-de-prova após a sinterização a 1000°C



Fonte: Autoria própria (2019).

O teor que obteve melhores desempenhos nos ensaios cerâmicos foi com adição de 30% de resíduo. Foi possível constatar que nessa formulação os desplastificantes contidos no resíduo proporcionaram tais resultados. A presença do quartzo, feldspato e calcita em conjunto com a argila, resultaram em corpos cerâmicos com maior fusibilidade e, consequentemente, maior densificação. Além disso,

apresentou um bom controle dimensional, parâmetro de extrema importância quando o assunto é evitar a ocorrência de defeitos.

É importante ressaltar que os corpos-de-prova formulados com até 60% de resíduo também apresentaram melhores valores que R0, porém para R30 as propriedades se mostraram mais pronunciadas.

Santos (1989) descreveu os ensaios físico-mecânicos para produtos provenientes da cerâmica desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT e apresentou os valores limites mínimos e máximos recomendados para cada tipo de ensaio. Na Tabela 1 encontra-se os valores descritos pelo autor e os resultados obtidos para a formulação R30:

Tabela 1: Valores limítrofes dos ensaios recomendados para materiais de cerâmica vermelha

Ensaio	Materiais Cerâmicos			
	Tijolos maciços	Tijolos furados	Telhas	R30
RLS (%) (máximo)	6,0	6,0	6,0	0,29 ± 0,13
RLQ (%) (máximo)	6,0	6,0	6,0	1,93±0,03
AA (%) (máximo)	-	8,0 a 25,0	20,0	17,18±0,09
PA (%) (máximo)	17,0 a 35,0	17,0 a 35,0	17,0 a 35,0	31,43±0,13
DA (g/cm ³) (mínimo)	1,7	1,7	1,7	1,83±0,00
TRF (MPa) (mínimo)	2,0	5,5	6,5	-

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Técnicas – IPT (1985 *apud* Silva, 2020).

A partir da tabela exposta acima, verifica-se que as características obtidas pela incorporação do resíduo estão dentro dos limites recomendados para materiais de cerâmica vermelha.

6.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS CERÂMICOS SINTERIZADOS A 1100°C

A seguir serão discutidos os resultados físicos e mecânico dos corpos-de-prova com adição de 30% de resíduo, sinterizados a 1100°C. Além disso, será feito a

comparação entre as duas temperaturas de queima utilizadas no trabalho, com a finalidade de analisar a influência do aumento da temperatura nas características finais dos corpos-de-prova. A Tabela 2 apresenta esses resultados:

Tabela 2: Resultados da caracterização física dos corpos cerâmicos queimados a 1000 e 1100°C

Temperatura de sinterização	RLQ (%)	AA (%)	PA (%)	DA (g/cm ³)
1000°C	1,93±0,03	17,18±0,09	31,43±0,13	1,83±0,00
1100°C	4,29±0,04	11,72±0,14	23,20±0,21	1,98±0,01

Fonte: A autoria própria (2021).

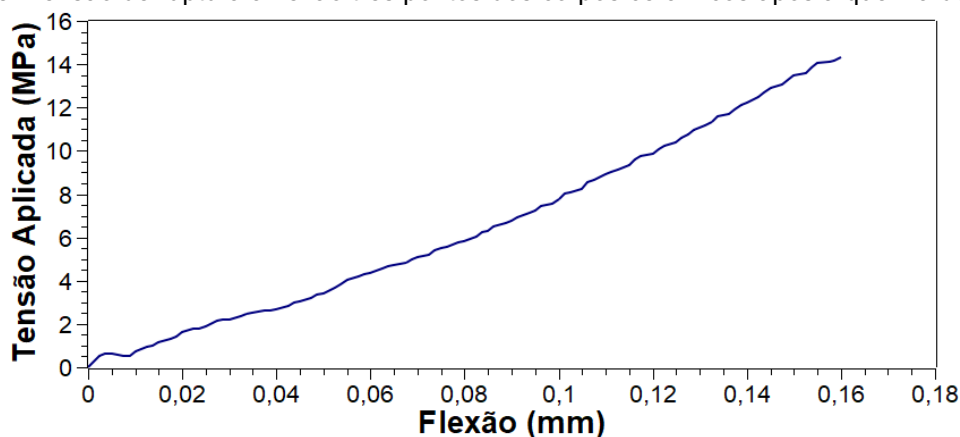
Em comparação com os corpos-de-prova sinterizados a 1000°C, o aumento da temperatura de sinterização para 1100°C resultou no aumento de 122% na retração linear de queima. O valor médio foi de 4,29%, dentro do limite aceitável para sua aplicação, como visto na Tabela 1. Este aumento da RLQ é explicado pela maior quantidade de fase líquida formada, resultado de um processo de vitrificação mais eficiente. Por volta de 900 e 950°C inicia-se as transformações mineralógica e o desenvolvimento das fases vítreas acompanhadas por uma retração. Em temperatura de 1000°C, pode ocorrer a reorganização dos cristais formando novas estruturas cristalinas ou fases amorfas adicionados a uma contração (GUIMARÃES, 2017).

O aumento da formação da fase vítrea propiciou uma maior densificação das peças cerâmicas, podendo ser comprovado pelo aumento da densidade aparente. Foi possível notar que a fase líquida formada preencheu mais os espaços entre a partículas não fundidas. Essa temperatura conduziu a redução da porosidade isolada das amostras, resultando em uma densidade média de 1,98%, aumento de 7,5% em relação a densidade obtida em 1000°C. Esse ponto positivo está relacionado aos processos de sinterização e vitrificação, intensificada pelos constituintes do resíduo como o feldspato e o quartzo.

Além disso, a diminuição da absorção de água e porosidade aparente evidenciam o fechamento dos poros com mais ligações vítreas desenvolvidas em temperaturas mais elevadas, geralmente acima de 1000°C. A absorção de água das amostras foi em média 11,72%, reduzida em aproximadamente 32% da absorção atingida na menor temperatura de queima. A porosidade aparente apresentou valor médio de 23,20%, com redução aproximada de 26% da porosidade encontrada para a amostra sinterizada a 1000°C.

Em temperaturas superiores a 1000°C, algumas mudanças físicas e químicas podem ocorrer. Novas fases cristalinas podem surgir a partir da metacaulinita tais como a mulita primária e espinélio Al:Si. O quartzo presente na argila e no resíduo tende a ser parcialmente dissolvido pelos fundentes, resultando em um processo mais acentuado de vitrificação (PINHEIRO; HOLANDA, 2010). A redução da porosidade devido ao preenchimento dos poros entre as partículas pela fase líquida confere maior resistência mecânica para a peça. Os dados de resistência à flexão fortalecem os resultados obtidos na caracterização física discutidas anteriormente. A tensão média de ruptura à flexão foi de $14,47 \pm 1,25$ MPa, superior ao recomendado para cerâmica vermelha, e seu comportamento médio está apresentado na Figura 18 a seguir:

Figura 18: Tensão de ruptura à flexão três pontos dos corpos cerâmicos após a queima de 1100°C



Fonte: Autoria própria (2021).

Após a queima, foi possível observar a presença de aglomerados nas superfícies das peças, como pode-se observar na Figura 19. Esse defeito provavelmente foi conduzido pela presença do óxido de cálcio que não reagiu com a massa para formação de fases estáveis. Depois da sinterização e repouso das amostras, nos locais onde esses óxidos se aglomeraram, o contato com o ar ambiente permitiu que se desenvolvessem reações de hidratação e recarbonatação (REBMANN; SALVETTI, 1999). Entretanto, esse defeito não influenciou significativamente a resistência mecânica das amostras, visto que os valores de tensão de ruptura encontram-se dentro dos limites recomendados.

Figura 19: Corpos-de-prova após a sinterização a 1100°C



Fonte: Autoria própria (2019).

É importante ressaltar que a argila utilizada neste estudo é empregada pela indústria para fabricação de tijolos, porém o processamento é feito através da extrusão como visto na seção 4.1.3.

Giori (2018) realizou a incorporação de resíduos de rochas silicáticas e carbonáticas em teores de 20%, sinterizadas a 1000°C. Os testes físicos indicaram que é possível a utilização desse teor de resíduo em cerâmica vermelha, sendo mais expressivo em resíduos de rochas silicáticas. Os resultados do ensaio de absorção de água e densidade aparente dos corpos-de-prova com resíduos silicáticos variaram, respectivamente, de 13,45% a 15,65% e 1,79 g/cm³ a 1,94g/cm³. Esses valores de absorção de água foram inferiores ao encontrado neste estudo, considerando a mesma temperatura de sinterização. Isso devido à presença de feldspato e quartzo, e a baixa quantidade de calcita nas composições das rochas silicáticas, que auxiliam na redução de absorção de água e de porosidade. Contudo, o resultado de densidade aparente para R30 (1,83 g/cm³), encontra-se dentro dos valores obtidos pela autora, evidenciando que o balanceamento entre os componentes fundentes e a calcita presentes no resíduo estudado, foi capaz de reduzir a porosidade isolada das amostras.

Silva et al (2005) utilizou resíduo de mármore e granito (10-50% em peso) em uma mistura de argilas, sinterizadas a temperaturas entre 950 e 1150°C. As amostras com 30% de resíduo sinterizadas a 1100°C, apresentaram absorção de água de

aproximadamente 10%, valor muito próximo comparado com R30, sinterizado na mesma temperatura. O valor de densidade aparente obtida neste trabalho ($1,98 \text{ g/cm}^3$), apresentou-se superior ao encontrado pelos autores, com valor aproximado de $1,87 \text{ g/cm}^3$. Tal fato reforça o processo acentuado de vitrificação nessa temperatura de sinterização, resultando em uma maior densificação das peças cerâmicas.

Por fim, verificou-se que os constituintes presentes no resíduo desempenham a função de desplastificante quando adicionados a argila. Foi possível incorporar até 60% de resíduo à massa, resultando em melhores propriedades físicas. Entre as dosagens sinterizadas a 1000°C , a que obteve melhores resultados foi com o teor de 30% de resíduo. Em relação ao efeito da temperatura de sinterização nas propriedades dos corpos-de-prova, constatou-se que a 1100°C houve o efeito mais pronunciado do processo de sinterização e vitrificação se comparado aos resultados obtidos nos corpos-de-prova sinterizados a 1000°C , resultando no aumento da retração linear de queima e densidade aparente, e na diminuição de absorção de água e porosidade aparente. Tais constatações reforçam a potencial utilização desses resíduos na indústria cerâmica, refletindo em ganhos econômicos e ambientais.

7 CONCLUSÃO

A fim de estudar a viabilidade de incorporação de resíduos de rochas ornamentais na formulação de mistura para fabricação de blocos e tijolos estruturais, foi possível concluir:

- O resíduo apresentou granulometria fina, devido ao processo de serragem das chapas de rochas ornamentais, podendo, portanto, ser incorporado às peças cerâmicas sem nenhum processo adicional de cominuição.
- Os resultados experimentais do resíduo constataram a presença de constituintes químicos que desempenham a função desplastificante. Os minerais fundentes (feldspato e calcita) e vitrificantes (quartzo) favoreceram a ocorrência de reações físicas e químicas, como a sinterização e vitrificação, parâmetros fundamentais para a indústria cerâmica. Além disso, a presença de materiais inertes (quartzo) resultou em peças com boa estabilidade dimensional, garantindo assim integridade estrutural ao produto.
- O processo de conformação das amostras apresentou-se eficaz, visto que as amostras não mostraram nenhum tipo de defeito como surgimento de trincas e empenamento.
- Foi possível incorporar até 60% de resíduo à massa, com melhora nas propriedades físicas dos corpos cerâmicos em comparação aos corpos formulados somente com argila.
- Entre as massas sinterizadas a 1000°C, a que apresentou melhores resultados foi a de 30% de resíduo. Foi possível constatar que nessa dosagem os valores de retração linear de secagem e queima, absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente apresentaram concordância com os indicados para utilização de cerâmica vermelha. Além disso, o valor obtido de absorção de água se enquadra a norma NBR 15270-2.
- As amostras sinterizadas a 1100°C apresentaram de forma mais acentuada os processos de sinterização e vitrificação, resultando no aumento da retração linear de queima e densidade aparente e na diminuição da absorção de água e porosidade aparente, em comparação com os resultados obtidos nas amostras sinterizadas a 1000°C.

- O resultado de resistência mecânica das amostras sinterizadas a 1100°C, também apresentou concordância com os valores indicados para uso de cerâmica vermelha.
- O defeito apresentado nas amostras sinterizadas a 1100°C não influenciou significativamente a resistência mecânica, portanto não conduziu a fragilização das amostras.
- A viabilidade da utilização desse resíduo é reforçada pela redução dos impactos ambientais decorrentes do descarte indevido, resultando em benefícios ao meio ambiente. Ademais, proporciona ganhos econômicos às empresas dos setores de Cerâmicas e de Rochas Ornamentais, promovendo uma destinação industrial para o que antes era descartado sem nenhum valor agregado.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho, sugere-se para trabalhos futuros:

- Utilização de outras composições de argila empregadas em indústrias cerâmicas.
- Analisar separadamente a influência de diferentes teores dos resíduos de rochas silicáticas e rochas carbonáticas em cerâmica vermelha.
- Aplicar a estatística de Weibull para resistência mecânica de cerâmica vermelha incorporada com resíduo.
- Incorporar o resíduo de rochas ornamentais na massa cerâmica utilizando o mesmo tipo de processamento (extrusão) utilizado na indústria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCERAM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. www.abceram.org.br. Acesso em: 21 jul. 2020.

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Balanco das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2020**. Informe 01/2021, Brasília - DF. Disponível em: <https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/02/Informe-01_2021-Balanco-2020.pdf > Acesso em: 02 fev. 2021.

ALENCAR, Carlos R. A. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: Rochas Ornamentais**. Instituto Euvaldo Lodi – Regional do Espírito Santo. Cachoeira de Itapemirim. IEL, 2013. Disponível em: < <https://www.sindirochas.com/arquivos/manual-rochas.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2021.

ALMEIDA, Thiago de F. et al. Caracterização do resíduo de mármore calcinado para utilização como fonte alternativa de carbonato de cálcio. IN: 2º CONRESOL, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais 2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**. Foz do Iguaçu: IBEAS, 2019. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/V-046.pdf>>. Acesso em: 21/04/2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 6502**: Rochas e solos, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 15012**: Rochas para revestimentos de edificações – Terminologia, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 15270-1**: Componentes Cerâmicos – Blocos e Tijolos para Alvenaria – Parte 1 Requisitos, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 15270-2**: Componentes Cerâmicos – Blocos e Tijolos para Alvenaria – Parte 2 Métodos de Ensaio, 2017.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM C326-09**: Standard test method for drying and firing shrinkages of ceramic whiteware clays. Estados Unidos, out. 2018.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM C373-14a**: Standard test method for water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products, ceramic tiles, and glass tiles. Estados Unidos, dez. 2014.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1161-13**: Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature. Estados Unidos, set. 2013.

BASTOS, Isadora A. **Utilização de resíduos de rochas ornamentais na fabricação de vidros sodo-cálcicos**. 2018. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santos, Vitória, 2018. Disponível

em: <https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/11190/1/tese_12772_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20FINAL%20Isadora%20Andrade%20Bastos.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2020.

BILDHAUER, Deise C. et al. Tijolos maciços com características refratárias a partir da incorporação de resíduo de mármore e granito. **Revista Liberato**. Novo Hamburgo, v. 16, n. 25, p. 1-100, jan./jun. 2015. Disponível em: <https://revista.liberato.com.br/ojs_lib/index.php/revista/article/view/339>. Acesso em: 02 nov. 2019.

CAMPOS, L. F. A. et al. Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural. **Cerâmica**, São Paulo, v. 45, n. 295, p. 140-145, mai 1999. Disponível em:

<https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69131999000500006&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 11 abr. 2021.

CHICON, Marcelo C. **Resíduos finos da indústria de rochas ornamentais: Os materiais depositados e os segregados**. 2019. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2019. Disponível em:

<http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/11054/1/tese_12069_MARCELLO%20CICILIO%20CHICON%20-%20DISSERTA%C3%87%C3%83O.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2020.

CHIODI FILHO, Cid.; CHIODI, Denize K. **Designação Comercial das Rochas Ornamentais e Classificação Fiscal de Seus Produtos**. Publicação técnica. ABIROCHAS. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Informes/Informe_04_2018Designacoes_Comerciais.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2020.

COLETI, J. L. et al. Caracterização do resíduo de mármore como componente de escórias dessulfurantes para aço. IN: CBECIMAT, 21, 2014, Cuiabá. **Anais 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Cuiabá: IAEA, 2014. Disponível em:

<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/48/047/48047225.pdf?r=1&r=1>. Acesso em: 21 abr. 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados: Segmento Cerâmica**. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-314/topico-407/PRODUTO%206_Vpublicacao.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2020.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha**. Belo Horizonte, 2013. Disponível em <http://www.feam.br/images/stories/3SMRR/guia_ceramica.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020.

GADIOLI, Monica C. B. et al. Microstructural Characterization of Clay-Based with the Addition of Granite Residues. **Materials Science Forum**. v. 958, p. 123-128, jan. 2019. Disponível em: <<https://www.cetem.gov.br/images/periodicos/2019/CAI0030.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2020.

GIORI, Ana J. N.; **Influência da variabilidade composicional dos resíduos de rochas ornamentais em propriedades físicas e microestruturais de cerâmica vermelha**. 2018. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufes.br/handle/10/10473>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

GUIMARÃES, Carlos A. de O. **Avaliação do ciclo de queima nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha**. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2017. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Disserta%C3%A7%C3%A3o_CarlosAOGuimaraes.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2020.

HEBHOU, Houria et al. Use of waste marble aggregates in concrete. **Construction and Building Materials**. v. 25, n. 3, p. 1167-1171, mar. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061810004708?via%3Dihub>>. Acesso em: 24 abr. 2019. Instituto de Geociência – IGC/USP. 2021. www.didatico.igc.usp.br. Acesso em: 21 jul. 2020.

Instituto de Pesquisas Técnicas – IPT. Ensaio de argila visando a utilização em cerâmica vermelha. São Paulo: **IPT**, 1985.

SOARES, R. A. L. et al. Comparação de Desempenho da Adição de Carbonato Calcítico e Dolomítico em Massa Cerâmica de Revestimento Queimada em Forno Industrial. **Cerâmica Industrial**. v. 21, n. 5-6, p. 16-24, set./dez. 2016. Disponível em: <<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/doi/10.4322/cerind.2016.034>>. Acesso em: 22 mar. 2021.

LUZ, Adão B. da; LINS, Fernando A. F. **Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

MACHADO FILHO, Mauro R. **Aproveitamento de resíduos graníticos finos na fabricação de cerâmica vermelha**. 2019. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2453/6/MONOGRRAFIA_AproveitamentoRes%C3%ADduosGran%C3%ADticos.pdf>. Acesso em: 15 set. 2020.

MAGALHÃES, Ana C. F. Mármore Bege Bahia: dos tempos pretéritos ao panorama atual. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 3, 2007, Natal. **Anais III Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais**. Rio de Janeiro:

CETEM/MCTI, 2008. p. 288-293. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1334/1/III_Congresso_Br%20RO%20288-293.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2021.

MELLO, Ivan S. de C. **A Cadeia Produtiva de Rochas Ornamentais e para Revestimento no Estado de São Paulo**: diretrizes e ações para inovação e competitividade. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2004. 197 p. Disponível em: <<https://ecivilufes.files.wordpress.com/2011/04/a-cadeia-produtiva-para-rochas-ornamentas-e-para-revestimento-no-estado-de-sc3a3o-paulo-artigo.pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2019.

MELLO, Ivan S. de C.; CHIODI FILHO, Cid; CHIODI, Denize K. **Atlas de Rochas Ornamentais da Amazônia Brasileira**. Relatório técnico – CPRM: Serviço Geológico do Brasil. São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/19413>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

MELLO, Roberta M. de; **Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha**. 2006. 69 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-04062007-164950/publico/RobertaMMello.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2018.

MENEZES, Romualdo R.; NEVES, Gelmires de A.; FERREIRA, Heber C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmica alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 303-313, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662002000200020&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 02 nov. 2018.

MME – Ministério de Minas e Energia; SGM – Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos**. 14^a ed., p. 21-23, 2019. Disponível em: <<http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/405154/Anu%C3%A1rio+Estat%C3%A4stico+do+Setor+de+N%C3%A3o+Met%C3%A1licos+2019/1ab93dc6-47b2-e947-a7f5-93a9ba95def0>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

MONTERO, M. A. et al. The use of a calcium carbonate residue from the stone industry in manufacturing of ceramic tiles bodies. **Applied Clay Science**. v. 43, n. 2, p. 186-189, fev. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131708001737>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. **Cerâmica**. São Paulo, v. 49, n. 312, p. 262-267, dez. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132003000400012&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 24 abr. 2019.

MOTTA, José F. M.; ZANARDO, Antenor; JUNIOR, Marsis. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. **Cerâmica Industrial**. v. 6, n. 2, mar./abr. 2001. Disponível em: <<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876570b7f8c9d6e028b4643/pdf/ci-6-2-5876570b7f8c9d6e028b4643.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

MOTTA, José F. M. et al. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte II: Os Minerais Industriais e as Massas da Cerâmica Tradicional. **Cerâmica Industrial**. v. 7, n. 1, jan./fev. 2002. Disponível em: <<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657107f8c9d6e028b4662/pdf/ci-7-1-587657107f8c9d6e028b4662.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2021.

QUEIROGA, Alessandra F. F. **A influência do uso de um resíduo siderúrgico no setor de cerâmica vermelha**. 2020. 60 f. Dissertação (Especialização em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/ri/bitstream/riufc/53382/1/2020_dis_affqueiroga.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2020.

QUEIROZ, Luiz F. T. **Efeito da quantidade de areia quartzosa no processamento, microestrutura e propriedades da cerâmica vermelha para telhas**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2009. Disponível em: <<https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/EFEITO-DA-AREIA-DE-QUARTZO-NO-PROCESSAMENTO.pdf>>. Acesso em: 06 ago. 2020.

OLIVEIRA, Ana M. C. P. de.; ANDRADE, Rodrigo do V. O uso de resíduos de pedras ornamentais na composição de tijolos cerâmicos. **Journal of Open Research**. v. 1, n. 3, dez. 2020. Disponível em: <<https://stellata.com.br/journals/jor/article/view/24>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

PINHEIRO, J. N. F.; HOLANDA, B. C. A. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 56, n. 339, p. 237-243, jul. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132010000300005>. Acesso em: 28 mar. 2021.

REBMANN, Markus S.; SALVETTI, Alfredo R. Efeito da adição de carbonatos em corpos cerâmicos – defeitos devido a formação de fases não estáveis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. 2-5 jun. 1999, Florianópolis, Santa Catarina. **Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbc/1999/Resumos/022.html>>. Acesso em: 18 mar. 2021.

REED, James S. **Principles of ceramics processing**. 2 ed. Nova Iorque: Wiley, 1995.

REINALDO FILHO, Lucídio L.; BEZERRA, Francisco D. **Informe setorial cerâmica vermelha**. Fortaleza: Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE) / Banco de Nordeste (BNB), out. 2010. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/documents/88765/89729/ano4_n21_informe_setorial_ceram>

ica_vermelha.pdf/66eb35dc-dd49-420d-a921-26e9efc320d9>. Acesso em: 30 jul. 2020.

SABOYA JUNIOR, F. A.; 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, n. 10, p. 1950-1960, out. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061806002145>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

SALES, Joseanne de L. **Reaproveitamento de Resíduos de Granito, Mármore e Caulim em compósitos de matriz cerâmica para produção de Placas de Revestimento**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/10734?locale-attribute=en>>. Acesso em: 22 abr. 2021.

SANTOS, Fernanda dos S. **Avaliação de massas cerâmicas, processamento e propriedades dos produtos de cerâmica vermelha do pólo cerâmico de Campos dos Goytacazes**. 2012. 115 f. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012. Disponível em: <<https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Diserta%C3%A7%C3%A3o-Fernanda-dos-Santos-Maia.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2021.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2º ed., São Paulo: Editora Blucher Ltda, 1989. v. 1, 408p.

SARDOU FILHO, Ruben et al. **Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo**. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2013. Disponível em: <<https://www.sindirochas.com/arquivos/atlas-rochas.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2021.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio à Micro e Pequenas Empresas. Cerâmica vermelha. **Boletim de Inteligência – Construção Civil**. p. 1-5, dez. 2015. Disponível em:

<[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/\\$File/5846.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/$File/5846.pdf)>. Acesso em: 21 jul. 2020.

SILVA, Mariane C. A. **Incorporação de finos de quartzito na produção de cerâmica vermelha**. 2020. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2020. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/11987/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_Incorpora%c3%a7%c3%a3oFinosQuartzito.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2020.

SILVA JR., Pedro F. da.; POMPEU, Bernardo B. P.; OLIVEIRA, Marco A. B. de. Cerâmica vermelha incorporada com resíduo de pedras ornamentais tratada termicamente. **Brazilian Journal of Development**. v. 6, n. 9, p. 72545-72561, set. 2020. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/17376>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

SILVA, J. B. et al. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, São Paulo, v.51, n. 320, p. 325-330, dez. 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132005000400004&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 12 mai. 2021.

SOARES, R. A. L. et al. Comparação de Desempenho da Adição de Carbonato Calcítico e Dolomítico em Massa Cerâmica de Revestimento Queimada em Forno Industrial. **Cerâmica Industrial**. v. 21, n. 5-6, p. 16-24, set./dez. 2016. Disponível em: <<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/doi/10.4322/cerind.2016.034>>. Acesso em: 22 mar. 2021.

SOKEN, Evelyn M. **Reaproveitamento do gesso descartado na construção civil em cerâmica vermelha**. 2015. 41f. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2015. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5326/1/LD_COEMA_2015_1_01.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2021.

SOTÉRIO, Jairo; MELCHIADES, Fábio G.; BOSCHI, Anselmo O. **Estudo da Influência do teor de calcita em diferentes tamanhos de partículas sobre as características de revestimentos cerâmicos**. In: 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 02 a 05 jun. 1999, Florianópolis. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbc/1999/Artigos/440.doc>>. Acesso em: 18/03/2021.

VIDAL, Francisco W. H.; AZEVEDO, Hélio C. A. de.; CASTRO, Nuria F. **Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1960>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

ZACCARON, Alexandre et al. **Estudo das propriedades de secagem cerâmica vermelha: Uma revisão**. In: 63º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 04 a 07 ago. 2019, Bonito. Disponível em: <https://www.academia.edu/42766811/Estudo_das_propriedades_de_secagem_de_cer%C3%A2mica_vermelha_Uma_revis%C3%A3o>. Acesso em: 12 nov. 2020.

APÊNDICE A – CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

O trabalho foi desenvolvido com base no cronograma de atividade apresentado no quadro a seguir:

Quadro 3 - Cronograma das atividades para realização do trabalho no período de 2019 a 2021.

Atividades	2019										2020					2021			
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Fev	Mar	Abr	Mai
Pesquisa Bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Planejamento Experimental		■	■	■	■														
Aquisição Materiais				■	■	■													
Defesa – TCC 1				■															
Metodologia				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Análise de Dados											■	■	■	■	■	■	■		
Discussões											■	■	■	■	■	■	■		
Conclusões																■	■		
Defesa – TCC 2																		■	■

Fonte: Autoria própria (2021).