



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS CRATEÚS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**KELVIANE MARQUES BARROS**

**ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE TÉCNICA DE  
REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO DA PEDRA CASTELO DO PIAUÍ**

**CRATEÚS**

**2026**

KELVIANE MARQUES BARROS

**ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE TÉCNICA DE  
REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO DA PEDRA CASTELO DO PIAUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Luisa Gardênia Alves Tomé Farias

CRATEÚS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- B278e Barros, Kelviane.  
Estudo de caracterização e viabilidade técnica de reaproveitamento do resíduo da pedra castelo do Piauí /  
Kelviane Barros. – 2026.  
51 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,  
Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2026.  
Orientação: Prof. Dr. Luisa Gardênia Alves Tomé Farias..
1. rochas ornamentais. 2. resíduos minerais. 3. construção civil. 4. sustentabilidade. 5. filler mineral. I.  
Título.

CDD 620

---

KELVIANE MARQUES BARROS

**ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE TÉCNICA DE  
REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO DA PEDRA CASTELO DO PIAUÍ**

Trabalho de conclusão de curso II apresentado ao Curso de Engenharia Civil do campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Luisa Gardênia Alves Tomé Farias.

Aprovado em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Eng. Afonso Augusto de Oliveira Neto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Janaina Lopes Leitinho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

M.e Paulo Rubens Melo Camelo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Consagre ao Senhor  
tudo o que você faz, e os seus  
planos serão bem-sucedidos.  
Provérbios 16:3

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser essencial em minha vida, autor do meu destino e meu guia. Foi Ele quem, nos momentos mais difíceis, concedeu-me forças para superar as adversidades e concluir esta jornada.

À minha mãe, Deusilene Marques, por todo o apoio, dedicação e cuidado ao longo dessa caminhada, sempre me fortalecendo para seguir em frente e conquistar tudo aquilo que sonhei.

À minha irmã, Cliciane Marques, pelo incentivo constante e por acreditar em meus planos, mostrando-me que nunca estive sozinha.

Aos meus amigos Beatriz Cartaxo, Lilliam Oliveira, Maria Luisa, Fabricio Andrade, Arthur Moreira e Paulo José, que se tornaram minha família ao longo dessa trajetória, compartilhando desafios, aprendizados e conquistas.

Ao Paulo Rubens Melo, que não mediu esforços para viabilizar a realização dos ensaios e contribuir de forma significativa para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Afonso Augusto, por nos conduzir aos melhores laboratórios e nos orientar de maneira fundamental para o adequado desenvolvimento da pesquisa.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Luisa Gardênia Alves Tomé Farias, por me acolher desde os primeiros semestres e por apresentar as melhores oportunidades dentro da universidade. Seu profissionalismo, dedicação e humanidade fazem da senhora um exemplo de professora, pesquisadora e pessoa, sendo uma grande inspiração para mim. Agradeço por sempre me mostrar que eu tinha com quem contar durante toda a graduação.

Por fim, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa, deixo meus mais sinceros agradecimentos.

## RESUMO

A indústria de rochas ornamentais possui grande relevância econômica no Brasil, porém gera elevados volumes de resíduos durante as etapas de extração e beneficiamento, os quais, quando descartados de forma inadequada, causam impactos ambientais significativos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de aproveitamento do Resíduo da Pedra Castelo do Piauí (RPCP) como material alternativo para aplicação na construção civil. O resíduo foi coletado no município de Castelo do Piauí e submetido a ensaios de caracterização granulométrica, limites de Atterberg e compactação Proctor Normal, além de análises químicas e mineralógicas por Fluorescência de Raios X (FRX), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Análise Termogravimétrica (TGA). Os resultados indicaram predominância de partículas finas, com diâmetros inferiores a 0,149 mm, permitindo a classificação do material como solo fino de baixa plasticidade (ML-CL), segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Esse enquadramento é adotado como uma analogia de comportamento mecânico, indicando baixa coesão e potencial para atuação como *filler* mineral. A composição química revelou caráter predominantemente silicoso, com teores relevantes de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e baixo teor de  $\text{CaO}$ , indicando comportamento majoritariamente inerte e elevada estabilidade térmica. Conclui-se que o RPCP apresenta características físicas, químicas e mineralógicas compatíveis com sua utilização como *filler* em materiais da construção civil. Contudo, esta pesquisa limita-se à etapa de caracterização, sendo necessários estudos futuros com ensaios de desempenho mecânico e reatividade álcali-agregado para validar sua aplicação em concretos e argamassas estruturais.

**Palavras-chave:** rochas ornamentais; resíduos minerais; construção civil; sustentabilidade; *filler* mineral.

## ABSTRACT

The ornamental stone industry plays a significant economic role in Brazil; however, it generates large volumes of waste during extraction and processing stages, which may cause considerable environmental impacts when improperly disposed of. In this context, this study aimed to evaluate the potential use of Castelo do Piauí Stone Waste (RPCP) as an alternative material for applications in the construction industry. The waste was collected in the municipality of Castelo do Piauí and subjected to particle size distribution analysis, Atterberg limits, and Standard Proctor compaction tests, as well as chemical and mineralogical analyses by X-ray Fluorescence (XRF), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Thermogravimetric Analysis (TGA). The results indicated a predominance of fine particles, with diameters smaller than 0.149 mm, allowing the material to be classified as a low-plasticity silt (ML) according to the Unified Soil Classification System (USCS). This classification is adopted as an analogy for mechanical behavior, indicating low cohesion and suitability for use as a mineral filler. The chemical composition revealed a predominantly siliceous material, with relevant contents of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and low  $\text{CaO}$  content, indicating largely inert behavior and high thermal stability. It is concluded that the RPCP presents physical, chemical, and mineralogical characteristics compatible with its use as a filler in construction materials. However, this research is limited to the characterization stage, and further studies involving mechanical performance tests and alkali–aggregate reactivity assessments are required to validate its application in structural concrete and mortar.

**Keywords:** ornamental stones; mineral waste; civil construction; sustainability; mineral filler.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Marcação da retirada dos ladrilhos de pedra morisca
- Figura 2 – Extração manual com ponteiros e marretas
- Figura 3 – Etapa de beneficiamento nas serrarias/maquinário
- Figura 4 – Ladrilhos com dimensões comerciais
- Figura 5 – Pilhas de resíduos no pólo da indústria ECB
- Figura 6 – Disposição dos resíduos no pólo da indústria ECB
- Figura 7 – Localização do local de coleta de resíduos - ECB em relação ao estado do Piauí
- Figura 8 – Local do corte na cidade de Castelo do Piauí – Fábrica ECB
- Figura 9 – Funcionamento esquemático do granulômetro a laser
- Figura 10 – Execução do ensaio de Limite de Liquidez e Plasticidade
- Figura 11 - Esquema da produção do resíduo gerado no beneficiamento da rocha ornamental
- Figura 12 – Bandas características do espectro de FTIR
- Figura 13 – Análise termogravimétrica (TGA)
- Figura 14 – Termogravimetria derivada (DTG)
- Figura 15 – Curva granulométrica por sedimentação
- Figura 16 – Curva de distribuição granulométrica obtida por granulometria a laser
- Figura 17 – Curva do ensaio de Limite de Liquidez
- Figura 18 – Curva de compactação – Ensaio Proctor Normal

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Setores de aplicação dos resíduos e características necessárias

Tabela 2 – Classificação do solo segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

Tabela 3 – Concentração dos componentes químicos do filler obtida por FRX

Tabela 4 – Composição química do cimento CP-II Z 32 obtida por FRX

Tabela 5 – Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal (teor de umidade)

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
DTG	Termogravimetria Derivada
FRX	Fluorescência de Raios X
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RPCP	Resíduo da Pedra Castelo do Piauí
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TGA	Análise Termogravimétrica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Considerações Iniciais.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Contexto e justificativa da investigação.....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>16</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Rochas ornamentais e geração de resíduos.....</b>	<b>17</b>
<b>3.3 Lavra e beneficiamento de rochas ornamentais.....</b>	<b>20</b>
<b>3.4 Resíduos gerados na produção de rochas ornamentais.....</b>	<b>22</b>
<b>3.5 Filler mineral na construção civil.....</b>	<b>23</b>
<b>3.6 Estudos anteriores com resíduos de rochas ornamentais.....</b>	<b>25</b>
<b>4 METODOLOGIA E MATERIAIS.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.1 Resíduo da Pedra Castelo do Piauí (RPCP).....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Execução dos Ensaios.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.1 Ensaio de Granulometria por peneiramento e sedimentação.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.2 Ensaio de granulometria a laser.....</b>	<b>30</b>
<b>4.2.3 Ensaio de Limites de Atterberg.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.4 Ensaio de Proctor Normal.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.5 Ensaio de Fluorescência de raio X - FRX.....</b>	<b>32</b>
<b>4.2.6 Ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR... </b>	<b>32</b>
<b>4.2.7 análise termogravimétrica TGA e DTG.....</b>	<b>32</b>
<b>5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1 Geração do resíduo no beneficiamento das rochas ornamentais.....</b>	<b>33</b>
<b>5.2 Análise química e mineralógica.....</b>	<b>33</b>
<b>5.2.1 Resultados do ensaio de FRX.....</b>	<b>33</b>
<b>5.2.2 Resultados do ensaio da Análise do FTIR.....</b>	<b>36</b>
<b>5.2.3 Resultados do ensaio de TGA.....</b>	<b>38</b>
<b>5.2.4 Resultados do ensaio de Granulometria por sedimentação.....</b>	<b>40</b>
<b>5.2.5 Resultados do ensaio de Granulometria a laser.....</b>	<b>41</b>
<b>5.2.6 Resultados do ensaio de Limites de Atterberg.....</b>	<b>42</b>
<b>5.2.7 Resultados do ensaio de Proctor Normal.....</b>	<b>43</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>44</b>
<b>6.1 Trabalhos Futuros.....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

A NBR 15012 (ABNT, 2013), estabelece a terminologia para rochas utilizadas em revestimentos de construções, também conhecidas como rochas ornamentais. A norma abrange conceitos geológicos e petrográficos fundamentais, definindo diversos tipos de rochas (como mármore, granito e quartzito) e suas características, incluindo texturas, estruturas e processos de alteração. No caso das rochas ornamentais, recebem a designação de rochas dimensionadas, uma vez que são extraídas em blocos e posteriormente transformadas em placas com padrões específicos de acordo com os projetos e demandas de comercialização.

De acordo com Montani (2021), o Brasil foi reconhecido, em escala global, como um dos principais produtores de rochas ornamentais, ocupando a quarta posição no ranking mundial no ano de 2020, sendo responsável por aproximadamente 5% da produção global. Entretanto, o aumento expressivo da produção acarreta uma elevação proporcional na geração de resíduos, compostos majoritariamente por partículas finas não biodegradáveis, provenientes do processo de corte das placas.

O principal desafio do setor de rochas ornamentais no século XXI consiste na destinação final adequada desses resíduos, cuja acumulação ocorre em grandes volumes, tanto no interior quanto no entorno dos polos de produção, o que representa um problema ambiental de difícil controle.

As rochas ornamentais são extraídas da natureza em forma de blocos e encaminhadas para serrarias, geralmente localizadas nas proximidades das áreas de lavra, onde ocorre o processo de beneficiamento. De acordo com Silveira, Vidal e Souza (2014), essa etapa tem como objetivo a transformação do bloco extraído em produto acabado ou semiacabado. Durante o beneficiamento, realizam-se operações como a serragem e o polimento, as quais consistem em processos de desgaste das superfícies das peças.

Segundo Souza (2023), a exploração de rochas ornamentais gera impactos ambientais de grande magnitude. Esses impactos manifestam-se ao longo de todo o ciclo produtivo, desde a extração até as etapas de beneficiamento, ocorrendo de forma sistêmica e desencadeando uma cadeia de efeitos negativos em escalas local e global. Tais consequências

têm sido amplamente investigadas por diferentes áreas do conhecimento, como a ecologia, a química e a geologia, evidenciando que a exploração e o processamento de recursos naturais figuram entre as principais pressões exercidas sobre os ecossistemas do planeta.

Além disso, parcela significativa dos materiais descartados ou que não atendem aos padrões de qualidade exigidos para a comercialização é depositada nas proximidades das áreas de extração, muitas vezes em desacordo com as normas ambientais vigentes relativas ao manejo e à destinação adequada dos resíduos. Nesse contexto, Amarante e Yamane (2021) destacam que a análise da vulnerabilidade ambiental em estudos de impacto ambiental associados à extração de rochas ornamentais indica que avaliações criteriosas dos impactos podem contribuir de forma significativa para o aumento da sustentabilidade do setor. Tal abordagem é fundamental para o desenvolvimento de uma mineração de rochas ornamentais que seja não apenas economicamente viável, mas também ambientalmente responsável e socialmente justa.

A geração de resíduos é uma etapa inerente a qualquer processo produtivo, e o acúmulo desses materiais tem suscitado preocupações em âmbito global, sobretudo no que diz respeito ao seu gerenciamento e às possibilidades de reaproveitamento sustentável. A Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os considerados perigosos, além de definir as responsabilidades dos geradores e do poder público, bem como os instrumentos econômicos aplicáveis. Essa legislação reforça a importância da gestão integrada dos resíduos sólidos como um conjunto de ações voltadas à busca de soluções sustentáveis, considerando as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, sob o princípio do desenvolvimento sustentável e com a participação do controle social.

## **1.2 Contexto e justificativa da investigação**

A Pedra Morisca faz parte da formação Longá, segundo Albuquerque e Dequech (1946), os autores utilizaram para citar a sequência de folhetos cinzas-escuros a pretos, fossilíferos, no qual são encontrados no Vale do Rio Longá.

A indústria de rochas ornamentais no Brasil gera cerca de 1.610.000 toneladas de resíduos sólidos por ano, concentrados principalmente nos estados do Espírito Santo, Bahia, Ceará, Paraíba entre outros estados (Chiodi Filho, 2005). No beneficiamento das rochas,

realizado por serragem em teares, aproximadamente 25% a 30% dos blocos são transformados em pó, enquanto a extração também produz placas quebradas e resíduos finos. A disposição desses materiais provoca impactos ambientais, como alteração da paisagem, emissão de poeira, instabilidade do terreno, degradação do solo e dificuldade de regeneração da vegetação (Gonçalves; Moura, 2002; Mothé Filho et al., 2005).

A presente pesquisa justifica-se pela necessidade de direcionar os resíduos gerados nas áreas de extração de rochas ornamentais para alternativas de reaproveitamento na construção civil. Tal justificativa fundamenta-se no expressivo acúmulo desses resíduos nos locais de lavra, os quais apresentam perdas médias de peças quebradas entre 65% e 75%, conforme apontado por Campos *et al.* (2009). Além de comprometer a eficiência produtiva, os resíduos gerados provocam impactos ambientais significativos, sobretudo em micro e pequenas empresas, onde o manejo adequado desses resíduos é frequentemente negligenciado, ficando aos arredores do local de extração. A grande dificuldade é encontrar alternativas que possam absorver este material, as quais atenderiam a critérios e especificações na construção civil.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Demonstrar a relevância do aproveitamento dos resíduos gerados na produção de rochas ornamentais, especialmente para aplicação na construção civil, como alternativa para a mitigação dos impactos ambientais e para a promoção do desenvolvimento sustentável do setor.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Determinar a composição química e mineralógica da Pedra Castelo;
- Verificar a viabilidade técnica da implementação do resíduo na construção civil;
- Investigar a compatibilidade química do resíduo da Pedra Castelo com os materiais tradicionalmente utilizados na construção civil.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos relacionados às rochas ornamentais, abrangendo sua definição, aplicações, produção em lavra e processos de beneficiamento, bem como os resíduos gerados e a caracterização geográfica da área de estudo.

#### 3.1 Rochas ornamentais e geração de resíduos

De acordo com Baylão e Wander (2022), a extração de rochas ornamentais apresenta relevância econômica, artística e cultural desde as primeiras civilizações. Esses materiais constituem recursos naturais de grande importância e são amplamente utilizados pelas indústrias da construção civil. O setor de mineração de rochas ornamentais possui particularidades em relação a outras atividades industriais, especialmente em função de seu processo de extração. Cada tipo de rocha demanda um fluxo produtivo específico e técnicas de lavra distintas, que sofrem influência de fatores geológicos, econômicos, industriais e estruturais.

De acordo com a NBR 15012 (ABNT, 2013), a rocha ornamental traz a definição de “material pétreo natural, utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliária e arte funerária” (p. 1). A Norma também traz o conceito de rocha para revestimento, sendo expresso por: “rocha ornamental submetida a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizada no revestimento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas”.

As rochas ornamentais são comercialmente denominadas “mármore” e “granito”, produtos que contribuem de forma significativa para a produção mundial do setor. O processo produtivo dessas rochas é classificado em três etapas distintas: a) mineração, que corresponde à exploração da rocha na forma de blocos; b) serraria, responsável pela transformação dos blocos em chapas; e c) marmoraria, etapa destinada ao polimento das peças (Bezerra, 2018).

As rochas ornamentais passam por um processo denominado de beneficiamento, em que ocorre tratamento dos blocos extraídos na lavra em produtos destinados ao uso na construção civil. De acordo com Silveira *et al.* (2014), o beneficiamento dessas rochas ocorre em duas etapas: primária e secundária. A etapa primária consiste na preparação e serragem dos blocos em chapas de espessuras variadas, podendo alcançar até 3 cm. Na etapa secundária, as chapas são submetidas a diferentes tipos de acabamento superficial, tais como

desbaste, polimento, escovamento, flameamento ou ainda à fabricação de peças específicas para projetos particulares.

A etapa de remoção dos blocos origina resíduos de natureza grosseira, geralmente constituídos por blocos fora dos padrões exigidos pelo mercado, cujas perdas podem atingir milhões de toneladas. Em pedreiras de quartzitos, por exemplo, às perdas costumam variar entre 80% e 90% (Almeida, 2023). Durante o beneficiamento, também ocorrem perdas significativas de resíduos grosseiros no aparelhamento dos blocos, conhecidos no setor como *casqueiro*, correspondendo a aproximadamente 14%. Na etapa de transformação dos blocos em chapas, realizada nas serrarias, são gerados os Resíduos Finos do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (FIBRO), que representam cerca de 26% do volume do bloco processado (Silveira; Vidal; Souza, 2014 apud Almeida, 2023).

### **3.2 Pedra Castelo do Piauí**

O município de Castelo do Piauí destaca-se como a principal área da porção norte do Estado do Piauí com ocorrência economicamente viável de rochas de revestimento, sendo a Pedra Morisca, localmente conhecida como Pedra Castelo, o litotipo de maior relevância. Essa rocha é explorada há vários anos e constitui uma importante atividade econômica regional, sobretudo pela geração de renda local associada à extração e ao beneficiamento artesanal (Silveira, 2012).

Geologicamente, a Pedra Morisca é classificada como um siltito, pertencente à Formação Longá, caracterizando-se como uma rocha sedimentar de granulação fina, com predominância de sílica e minerais argilosos. A exploração ocorre majoritariamente por métodos artesanais, o que resulta em elevado volume de resíduos finos gerados durante o corte, desdobramento e acabamento das placas. Esses resíduos, frequentemente dispostos de forma inadequada, configuram um passivo ambiental relevante para a região (Freitas Filho, 2018).

As características sedimentares da Pedra Morisca condicionam diretamente o comportamento físico, químico e mineralógico de seus resíduos. A predominância de fases silicosas e aluminosilicatadas, associada à baixa plasticidade e elevada finura, confere ao material potencial para reaproveitamento em aplicações na construção civil, especialmente como adição mineral ou *filler* em matrizes cimentícias. Dessa forma, a valorização dos resíduos da Pedra Morisca representa uma alternativa tecnicamente promissora para reduzir

impactos ambientais e promover o uso sustentável dos recursos minerais do município de Castelo do Piauí.

De acordo com dados técnicos fornecidos pela ECB Rochas Ornamentais do Brasil LTDA, a Pedra Morisca, denominação comercial atribuída ao siltito extraído no município de Castelo do Piauí, apresenta propriedades físicas e mecânicas compatíveis com sua aplicação como rocha de revestimento. A empresa, atuante no setor desde 1998 e com reconhecimento internacional, disponibiliza informações baseadas em ensaios realizados segundo normas europeias (UNE-EN), as quais atestam o desempenho do material.

A Pedra Morisca é classificada como Classe A1 quanto à reação ao fogo, sendo considerada material incombustível, conforme decisão 96/603/EC e suas modificações. Em relação ao comportamento mecânico, apresenta resistência à flexão média de 7,86 MPa, com valor médio reportado de  $18,82 \pm 5,78$  MPa, conforme a norma UNE-EN 12372, além de resistência ao ancoramento de  $2574 \pm 661,4$  N (UNE-EN 13364). A resistência à heladicidade (ciclos de gelo e degelo) apresenta valor médio de  $17,70 \pm 5,57$  MPa, indicando estabilidade mecânica frente a variações térmicas, conforme a UNE-EN 12371.

Quanto às propriedades físicas, a Pedra Morisca apresenta permeabilidade ao vapor d'água classificada como NPD, perda de massa de apenas 0,31% após 20 ciclos de choque térmico, sem alterações visuais significativas (UNE-EN 14066), e densidade aparente de  $2.41 \pm 0.02$  Mg/m<sup>3</sup>, determinada segundo a UNE-EN 1936. Esses resultados evidenciam um material denso, estável e com boa durabilidade, características que justificam sua ampla utilização como revestimento ornamental.

A área de pesquisa compreende as pedreiras localizadas a aproximadamente 5 km da sede do município de Castelo do Piauí, no Estado do Piauí, distante cerca de 190 km de Teresina, capital do estado. O município de Castelo do Piauí possui área territorial de 2.237,08 km<sup>2</sup>, tendo como limites os municípios de Pedro II, ao norte; São Miguel do Tapuio, ao sul; Campo Maior, Alto Longá e São João da Serra, a oeste; e uma área em litígio entre os estados do Piauí e Ceará, a leste.

Além de Castelo do Piauí, ocorrências da rocha também são registradas no município de Juazeiro, ampliando a distribuição regional deste litotipo. Entretanto, é em Castelo do Piauí que se concentram as principais frentes de lavra e as atividades de exploração.

Nesse contexto, os dados fornecidos pela empresa reforçam o potencial técnico da Pedra Morisca não apenas para aplicações arquitetônicas, mas também indicam que os resíduos gerados durante seu beneficiamento apresentam características físicas favoráveis ao reaproveitamento em materiais da construção civil, desde que avaliados por ensaios específicos de desempenho e durabilidade

### 3.3 Lavra e beneficiamento de rochas ornamentais

O processo de extração, ou lavra, é a fase inicial na cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais, sendo sucedido pelas etapas de beneficiamento, os resíduos da mineração são encontrados em forma de pó de rocha sendo derivado do corte e do polimento das peças (Figura 1). A lavra da pedra é extraída de modo rudimentar, realizada com a instrumentalização de ponteiros e marretas (Figura 2). O objetivo fundamental é remover o material útil ou economicamente aproveitável dos maciços, para garantir a obtenção de blocos retangulares que se encaixem nos padrões de comercialização.

**Figura 1** - Marcação da retirada dos ladrilhos de pedra morisca



Fonte: Autor (2025).

**Figura 2** - Extração manual com ponteiros e marretas



Fonte: Autor (2025).

Com a utilização de água para o corte da rocha, formam-se poças de lamas, em que partes são depositadas em espaços destinados à sedimentação, e o restante depositado no meio ambiente dentro da própria mineradora.

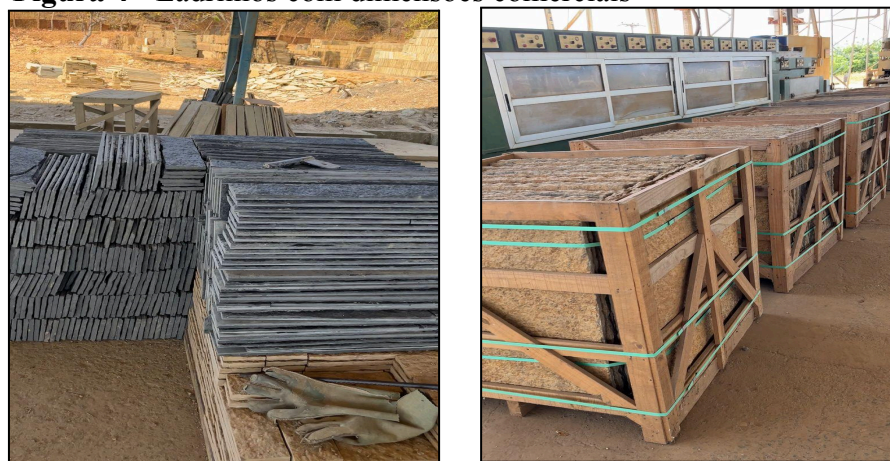
Após a retirada dos blocos nas lavras de extração, o material é encaminhado para o acabamento nas serrarias (Figura 3). Esta etapa subsequente inclui a serragem dos blocos em chapas, o polimento das chapas e o corte em ladrilhos com dimensões comerciais (Figura 4). Em todas as fases do processo, desde a extração até o corte final, há a geração de resíduo.

**Figura 3** - Etapa de beneficiamento nas serrarias/Maquinário



Fonte: Autor (2025).

**Figura 4** - Ladrilhos com dimensões comerciais



Fonte: Autor (2025).

### 3.4 Resíduos gerados na produção de rochas ornamentais

A NBR 10004 (ABNT, 2004), estabelece a classificação de resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, com o objetivo de garantir seu

gerenciamento adequado. Esta norma classifica os resíduos em Classe I (Perigosos) e Classe II (Não Perigosos), subdividindo a última em Não Inertes (II A) e Inertes (II B), e detalha os critérios para identificar características de periculosidade como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Estão incluídos na norma a categoria de resíduos sólidos que abrange os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição, e especificamente, determinados líquidos cuja disposição final na rede pública de esgotos ou em corpos de água é considerada tecnicamente e economicamente inviável.

Levando em consideração a produção e rochas ornamentais na lavra (extração) e no beneficiamento das rochas, existe uma produção indesejada de resíduos durante todo o seu processo. Além das perdas da produção no momento de separação das placas, estas quantidades comumente são apenas realocadas para depósitos a céu aberto.

Segundo Campos et al. (2009), um dos motivos de se ter grandes volumes de perdas na indústria extrativa é que, nos últimos 20 anos, a venda de mármore foi impulsionada pela solicitação do comércio exterior, ocorrida na década de 80, em que o Brasil alavancou suas vendas para a exportação. Com esse desenvolvimento vindo de maneira tão acelerada, o setor tecnológico não conseguiu acompanhar, referentes aos métodos de extração, beneficiamento e destino dos resíduos.

Na figura 5 e 6 é possível identificar os resíduos grossos que são resultantes da extração dos blocos para a confecção das pedras ornamentais e acúmulo de lamas resultantes das disposições inadequadas dos resíduos da lavra.

**Figura 5 - Pilhas de resíduos no pólo da indústria ECB**



Fonte: Autor (2025).

**Figura 6** - Disposição dos resíduos no pólo da indústria ECB



Fonte: Autor (2025).

Conhecendo os resíduos gerados, é possível diferenciar de acordo com as dimensões granulares maiores advindas da quebra, e os materiais inutilizados vindo do corte das placas, que são descartados em grandes quantidades. Tal material de rocha é misturado com água no momento do corte sobre os discos diamantados para a refrigeração e redução da poeira dos mesmos, formando os efluentes líquidos, e quando secos, resulta-se um pó fino que é denominado ao longo do trabalho como *Filler* dos resíduos.

### **3.5 *Filler* mineral na construção civil**

O *filler* mineral consiste em um material particulado extremamente fino, geralmente com granulometria inferior a 0,149 mm, utilizado como adição em concretos, argamassas e outros compósitos da construção civil, com a finalidade de atuar por mecanismos físicos, e não necessariamente químicos. Sua incorporação promove o preenchimento de vazios entre partículas maiores, melhorando o empacotamento granular, a compacidade e a microestrutura do material final (Neville, 2016; Isaia, 2011). Diferentemente de adições minerais reativas, como as pozolanas, o filler atua predominantemente como material inerte ou de baixa reatividade, contribuindo para o desempenho mecânico e reológico por efeito físico.

Segundo Isaia (2011), a presença de partículas finas favorece o rearranjo do esqueleto granular e reduz o volume de vazios capilares, o que resulta em maior densificação da matriz cimentícia. Esse efeito está diretamente associado à melhoria da trabalhabilidade no estado fresco, redução da segregação e exsudação, além de ganhos de resistência mecânica em idades iniciais, decorrentes do efeito nucleante exercido pelas partículas finas sobre os produtos de

hidratação do cimento. Mehta e Monteiro (2008) destacam que esse efeito físico pode ser tão relevante quanto reações químicas em sistemas bem dosados.

Resíduos minerais provenientes da indústria de rochas ornamentais têm sido amplamente investigados como fontes alternativas de *filler*, em função de sua elevada finura, disponibilidade em grandes volumes e composição predominantemente silicosa ou aluminosilicatada. Estudos realizados por Gonçalves (2000), Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) e Vidal *et al.* (2014) demonstram que esses resíduos apresentam desempenho satisfatório quando utilizados como *filler* em argamassas e concretos, contribuindo para o empacotamento das partículas e para a redução da porosidade, sem comprometer significativamente as propriedades mecânicas do material.

Do ponto de vista químico, *fillers* de origem silicosa tendem a apresentar comportamento predominantemente inerte, atuando principalmente por efeitos físicos, conforme discutido por Mitchell e Soga (2005). A ausência de teores elevados de óxidos de cálcio e de fases carbonáticas instáveis reduz o risco de reações deletérias e variações volumétricas indesejáveis, especialmente em ambientes cimentícios altamente alcalinos. Assim, a utilização de resíduos minerais finos como filler representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável, alinhada aos princípios da economia circular e à Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

### **3.6 Estudos anteriores com resíduos de rochas ornamentais**

Nas pedreiras de rochas ornamentais e de revestimento, observa-se, nas etapas de lavra, a ocorrência de perdas expressivas, resultando no acúmulo de grandes volumes de resíduos frequentemente descartados no meio ambiente. Esse descarte inadequado ocasiona impactos ambientais significativos, como o assoreamento de rios e córregos nas regiões onde se encontram instalados os teares e talha-blocos.

As possibilidades de redução dos rejeitos gerados nas etapas de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais e de revestimento apresentam limites técnicos objetivos, o que implica que tais resíduos continuarão a ser produzidos. Nesse contexto, a tabela 1 traz o aproveitamento e/ou a reciclagem desses bens minerais configuram-se como uma alternativa estratégica, capaz de transformar uma importante fonte de custos em oportunidade de geração de receita ou, ao menos, de redução das despesas associadas à disposição final dos resíduos (Vidal, 2003).

Tabela 1 - Setores de aplicação dos resíduos e características necessárias

TIPOS DE RESÍDUOS	FUNÇÃO DO RESÍDUOS	CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS	OPERAÇÕES UNITÁRIAS NECESSÁRIAS
<b>USO: CERÂMICA</b>			
Resíduos que apresentam altos teores de feldspatos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fundente, diminuição da temperatura de vitrificação e queima da cerâmica.</li> <li>• Permite maior controle da contração linear. Diminui a porosidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Granulometria &lt; 0,149 mm</li> <li>• Baixo teor de ferro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Britagem</li> <li>• Moagem</li> <li>• Peneiramento</li> <li>• Separação Magnética</li> </ul>
<b>USO: CONCRETO E ARGAMASSA</b>			
Silicáticos e Carbonáticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carga Aumentar a resistência à compressão e abrasão do concreto.</li> <li>• Aumentar a resistência a cloretos e sulfatos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forma arredondada de partículas.</li> <li>• Perda ao fogo &gt; 40%</li> <li>• Teor de ferro &lt; 0,7%</li> <li>• Teor de alumínio &lt; 2%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Britagem</li> <li>• Moagem</li> <li>• Peneiramento</li> <li>• Separação Magnética</li> </ul>

Fonte: Adaptado de MOFATI et al. (2013)

Pesquisas que têm estudado o resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de:

- **Concreto e argamassa**

O concreto auto-adensável (CAA) foi desenvolvido no Japão em 1988 e caracteriza-se pela elevada trabalhabilidade no estado fresco, capacidade de preenchimento das fôrmas e passagem entre armaduras sem necessidade de vibração, além de alta resistência à segregação (Okamura, 1997, apud Mesquita et al., 2009 ). Sua utilização proporciona melhorias nas condições de trabalho, redução do esforço físico, eliminação de ruídos e maior segurança aos trabalhadores, além de contribuir para a industrialização da construção civil, com ganhos em qualidade, durabilidade e redução dos custos com mão de obra (Tutikian, 2004, apud Mesquita et al., 2009).

A incorporação de aditivos superplastificantes e adições minerais, como o *filler*, é fundamental para o desempenho do CAA, especialmente no controle da viscosidade e das propriedades reológicas. O uso de *filler* proveniente da indústria de rochas ornamentais, além

de melhorar as características do concreto no estado endurecido, apresenta viabilidade ambiental ao reutilizar resíduos industriais. O estudo da influência do tempo na trabalhabilidade é essencial para a adequada execução das estruturas e para a definição do processo construtivo mais eficiente. (Mesquita et al., 2009).

A incorporação de *filler* mineral em concretos promove o refinamento da estrutura de poros por meio do preenchimento de vazios e do melhor empacotamento das partículas, contribuindo para a redução da taxa de absorção de água e para o aumento do tempo de saturação do material. Embora não haja ligação química significativa entre o *filler* e a matriz cimentícia, seu efeito físico favorece a densificação da microestrutura. Em termos mecânicos, a adição de *filler* apresenta influência positiva na resistência à tração na flexão, especialmente para teores moderados, ainda que os ganhos sejam inferiores aos observados na resistência à compressão. Esse comportamento está associado à aceleração da hidratação do cimento nas idades iniciais, resultante do efeito nucleante das partículas finas (Gonçalves, 2000).

Segundo os autores Santos, Apolinário e Ribeiro (2013), o resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) é gerado durante o beneficiamento de rochas ornamentais, na etapa de serragem dos blocos, originando uma lama abrasiva composta por partículas finas, água e subprodutos do processo. O RCMG possui características técnicas favoráveis à sua utilização como adição em matrizes cimentícias, destacando-se sua elevada estabilidade e resistência à abrasão, que em matrizes cimentícias, ele tem a capacidade de agir como *filler*, ocupando os espaços vazios existentes em argamassas e concretos e, assim, modificando suas características reológicas. O *filler* por se tratar de um material fino, tende a influenciar significativamente as propriedades reológicas de argamassas, especialmente a viscosidade e o comportamento de escoamento, aspectos diretamente relacionados à distância entre as partículas e às forças de atrito internas. O resíduo é coletado na forma de lama e apresenta composição química variável, em função da proporção de mármore e granito processados em cada lote, sendo caracterizado principalmente pela presença de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), além de óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), proveniente do desgaste das lâminas de corte.

- **Peças Cerâmicas**

Os resíduos gerados pela indústria de rochas ornamentais apresentam características mineralógicas e químicas relevantes, destacando-se a presença de óxidos alcalinos, como  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , e alcalino-terrosos, como  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ , os quais favorecem a formação de fase

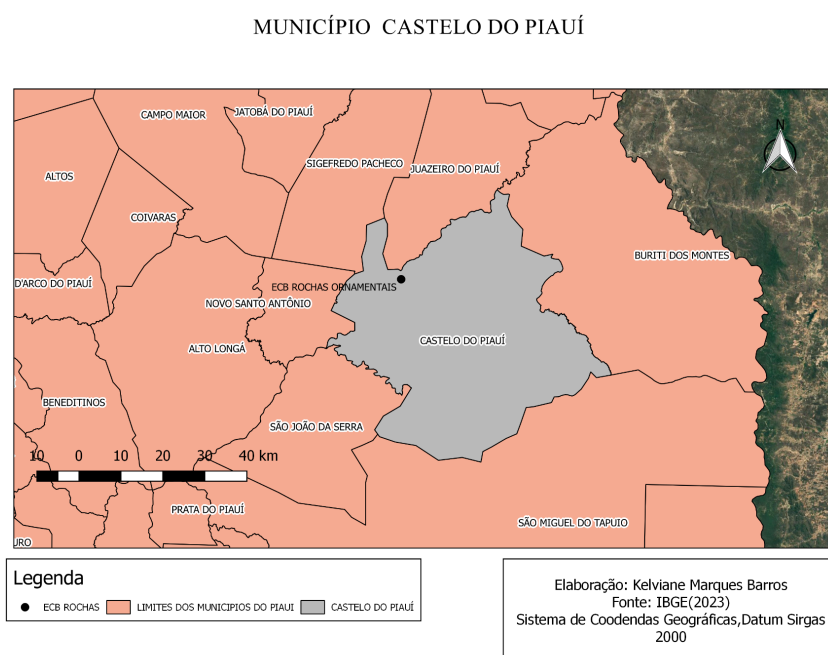
líquida durante o processo de queima de materiais cerâmicos (Gadioli et al., 2019a; 2019b; Aguiar *et al.*, 2014a; 2014b; Babisk *et al.*, 2014 apud Aguiar E Gadioli 2021). Nesse contexto, pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento têm investigado alternativas para a reinserção desses resíduos no ciclo produtivo de novos materiais, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para a transição do modelo econômico linear para um modelo baseado na economia circular, promovendo maior sustentabilidade no setor (Vidal *et al.*, 2014 apud Aguiar e Gadioli 2021 ).

## 4 METODOLOGIA E MATERIAIS

### 4.1.1 Resíduo da Pedra Castelo do Piauí (RPCP)

O material escolhido para análise é chamado de Resíduo da Pedra Castelo do Piauí (RPCP), o mesmo foi cedido pela empresa ECB - Rochas Ornamentais do Brasil, responsável pela produção de placas de pedra natural para revestimentos, localizada na cidade de Castelo do Piauí (Figura 7). As amostras foram coletadas no local do corte (Figura 8), para que a simulação fosse o mais próximo da realidade da sua composição, sem que houvesse interferência com outros tipos de solos.

**Figura 7** - Localização do local de coleta de resíduos - ECB em relação ao estado do Piauí



Fonte: Autor (2025).

**Figura 8** - Local do corte na cidade Castelo do Piauí - Fábrica ECB



Fonte: Autor (2025).

A coleta das amostras na empresa ECB - Rochas Ornamentais do Brasil justifica-se pelo expressivo volume de pó fino gerado durante o corte e beneficiamento das peças. Embora o volume total mensal não tenha sido quantificado neste estudo, a prática industrial do setor indica que cerca de 26% do volume do bloco processado é transformado em resíduos finos, gerando um passivo que demanda destinação sustentável conforme a PNRS.

## **4.2 Execução dos Ensaios**

### *4.2.1 Ensaio de Granulometria por peneiramento e sedimentação*

Conforme a norma NBR 7181 – ABNT (2016), foi realizado o ensaio granulométrico por peneiramento e sedimentação em uma amostra de resíduo. Inicialmente, a amostra foi preparada e peneirada na peneira nº 10 (abertura de 2,0 mm), visando separar a fração grossa (material retido) da fração fina (material passante).

Da fração fina, foram retirados 120 g para o ensaio de sedimentação, enquanto a fração grossa foi utilizada integralmente no peneiramento. Para o processo de dispersão, utilizou-se hexametáfosfato de sódio, conforme recomendado pela NBR 7181 (ABNT, 2016), com a finalidade de desagregar os grãos e promover melhor dispersão da amostra. Em seguida, a fração grossa foi lavada na peneira nº 10 para remoção de finos aderidos e posteriormente levada à estufa a 105 °C até atingir massa constante.

Após a secagem, realizou-se o peneiramento a seco da fração grossa, permitindo a obtenção da curva granulométrica correspondente. Já para a fração fina, o ensaio de

sedimentação foi conduzido com leituras em intervalos definidos pela norma, sendo posteriormente realizada a lavagem final do material na peneira nº 200 (0,075 mm) e submetido ao novo peneiramento. A classificação das partículas quanto às faixas granulométricas seguiu o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), conforme apresentado na Tabela 2, que define os intervalos para pedregulho, areias (grossa, média e fina), silte e argila.

Tabela 2 - Classificação do solo - SUCS

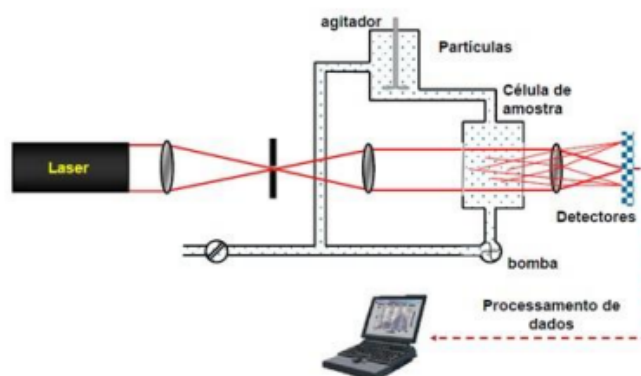
<b>Pedregulho</b>	76,2 mm - 4,76 mm
<b>Areia grossa</b>	4,76 mm - 2,00 mm
<b>Areia média</b>	2,00 mm - 0,42 mm
<b>Areia fina</b>	0,42 mm - 0,074 mm
<b>Silte</b>	0,074 mm - 0,005 mm
<b>Argila</b>	< 0,005 mm

Fonte: Autor (2025).

#### 4.2.2 Ensaio de granulometria a laser

O ensaio de granulometria a laser baseia-se na medição da intensidade da luz espalhada à medida que um feixe de laser interage com as partículas do material. Essa interação é analisada por meio de cálculos da distribuição do tamanho das partículas, realizados a partir do padrão de espalhamento gerado (Figura 9) (De Oliveira *et al.*, 2016).

**Figura 9** - Funcionamento esquemática representando o funcionamento do granulômetro a laser.



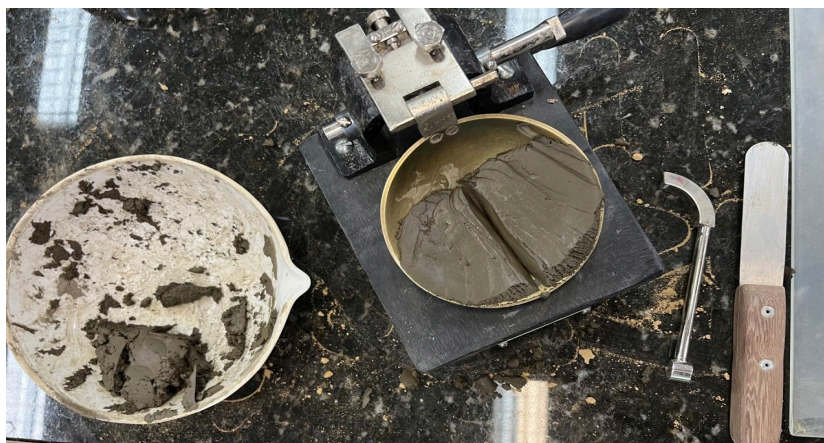
Fonte: Modificado de Allen T. (1981).

Segundo o autor Lima et al. (2009 apud De Oliveira et al., 2016), o software do granulômetro determina a concentração adequada da amostra a partir da medição da atenuação da intensidade do feixe de laser ao atravessar o material, fenômeno denominado obscurecimento, expresso em porcentagem. O valor de obscurecimento aceitável para a realização do ensaio deve situar-se entre 10% e 30%. Dessa forma, a amostra selecionada sem passagem prévia em nenhuma peneira, é adicionada gradualmente ao sistema até que esse intervalo seja atingido, sendo todo o processo monitorado por software específico. Nos ensaios realizados, verificou-se que a adição de aproximadamente 1 g de amostra foi suficiente para alcançar a faixa de obscurecimento recomendada.

#### *4.2.3 Ensaio de Limites de Atterberg*

Para a obtenção das características de plasticidade dos solos, são utilizadas as normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), sendo determinadas pelo método de Casagrande, constituídas pelo limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) para cálculo do índice de plasticidade (IP), também denominamos de Limites de Atterberg.

**Figura 10** - Execução do ensaio de Limite de Liquidez e Plasticidade



Fonte: Autor (2025).

#### *4.2.4 Ensaio de Proctor Normal*

O ensaio foi conduzido de acordo com a norma da NBR 6457 (ABNT, 2016), para se obter a curva de compactação. Para tal feito é necessário realizar o ensaio de Proctor Normal, em que o corpo de prova é em formato cilíndrico pequeno e a amostrada é compactada a 26 golpes por camada, havendo, 3 camadas no corpo de prova final. E após a secagem da amostra na estufa, determinou-se a umidade ótima do solo pesquisado.

#### *4.2.5 Ensaio de Fluorescência de raio X - FRX*

O ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) foi empregado com a finalidade de determinar a composição química elementar do solo e das misturas contendo resíduo, possibilitando a identificação dos principais óxidos e elementos constituintes dos materiais analisados. Trata-se de uma técnica instrumental amplamente utilizada na caracterização de materiais minerais, por fornecer resultados rápidos, precisos e não destrutivos. As análises foram realizadas no Laboratório de Química da Universidade Federal do Ceará (UFC), campus do Pici.

#### *4.2.6 Ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR*

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foi estudada a fim de permitir a caracterização da composição química do resíduo derivado do corte das rochas ornamentais. A radiação infravermelha induz vibrações nas ligações moleculares, e a absorção em frequências específicas gera um espectro característico, que atua como uma impressão digital da substância, possibilitando a identificação de sua estrutura química e dos grupos funcionais presentes.

#### *4.2.7 análise termogravimétrica TGA e DTG*

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada conforme os princípios das normas ASTM E1131 e ABNT NBR ISO 11358, que estabelecem os procedimentos para avaliação da variação de massa de um material em função da temperatura sob atmosfera controlada. Esse ensaio permite analisar a estabilidade térmica do material, identificando faixas de temperatura nas quais sua estrutura permanece estável, bem como intervalos associados à perda de massa, degradação ou decomposição.

De forma complementar, a análise termogravimétrica derivada (DTG) corresponde à derivada da curva de TGA em relação à temperatura, permitindo identificar com maior precisão as temperaturas nas quais ocorrem os principais eventos térmicos. Os picos observados na curva DTG indicam as taxas máximas de perda de massa, facilitando a distinção entre fenômenos como evaporação de água, desidroxilação de minerais argilosos, decomposição de compostos orgânicos e decomposição de carbonatos.

Assim, a combinação das técnicas TGA e DTG possibilita uma avaliação mais detalhada do comportamento térmico e da composição do material, sendo amplamente utilizada na caracterização de solos, resíduos minerais e materiais de origem geológica.

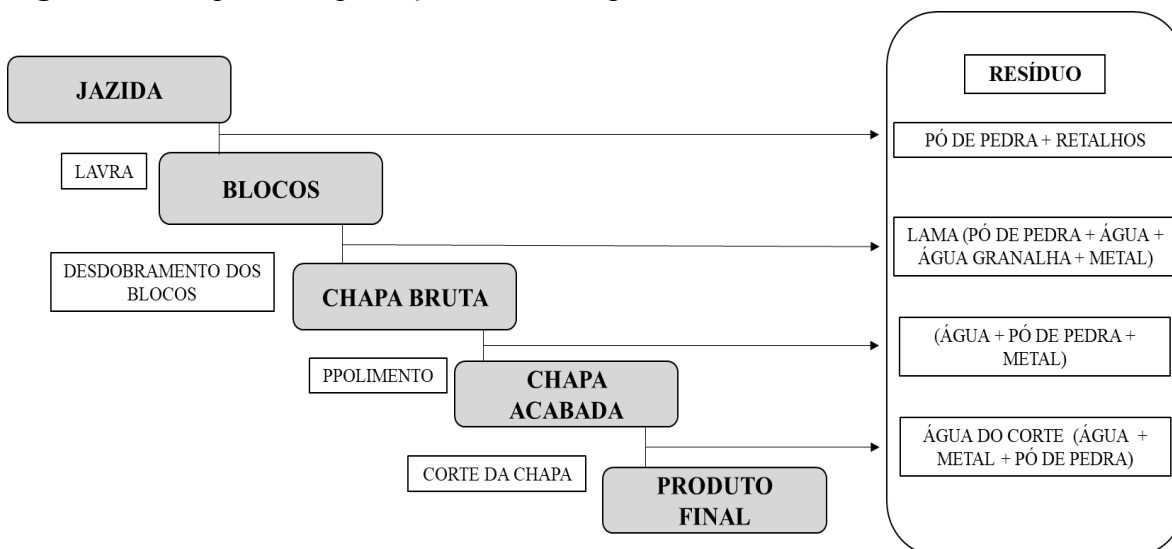
## 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados os resultados do trabalho e a discussão pertinente aos tópicos desenvolvidos durante todas as fases da pesquisa, considerando-se as metodologias e técnicas aplicadas. Os ensaios de granulometria, limite de Atterberg, FTIR, FRX, granulometria a laser e análises de TGA e DTG.

### 5.1 Geração do resíduo no beneficiamento das rochas ornamentais

Na figura 11 é realizado um esquema de produção do resíduo durante o beneficiamento da rocha ornamental, mostrando que a partir da etapa de produção de blocos a produção do pó fino derivado do corte já começa a ser produzido.

**Figura 11** - Esquema da produção do resíduo gerado no beneficiamento da rocha ornamental



Fonte: Adaptado de Avarez e Reis (2007), (dados de GOMES et al., 2004, p.15).

### 5.2 Análise química e mineralógica

A fim de se determinar as propriedades geotécnicas e mineralógicas, foi realizado FRX, FTIR, TGA, DTG, Análise Granulométrica por Sedimentação, Granulometria a Laser, Limites de Atterberg, Proctor normal, nos laboratórios da Universidade Federal do Ceará.

### 5.2.1 Resultados do ensaio de FRX

Tabela 3 - Concentração de Componentes Químicos do *filler*

Componente	Concentração	Unidade
SiO <sub>2</sub>	48,97	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,05	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,78	%
K <sub>2</sub> O	2,07	%
TiO <sub>2</sub>	1,14	%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,47	%
SO <sub>3</sub>	0,34	%
CaO	0,2	%
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	263,1	ppm
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85,4	ppm
MnO	617,5	ppm

Fonte: Autor (2025).

A análise por Fluorescência de Raios X (FRX) observada na tabela 3 permitiu a determinação da composição química global do material, evidenciando a predominância de SiO<sub>2</sub> (48,97%), seguida por teores significativos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10,05%), além de menores concentrações de outros óxidos, como K<sub>2</sub>O (2,07%), TiO<sub>2</sub> (1,14%), SO<sub>3</sub> (0,34%) e CaO em teor muito baixo (0,2%). Essa composição caracteriza o material como silicoso-aluminosilicatado, coerente com a presença de minerais como quartzo e argilominerais, especialmente a caulinita, comportamento amplamente descrito para resíduos minerais utilizados como *filler* na construção civil (Mitchell; Soga, 2005).

A elevada concentração de SiO<sub>2</sub> está associada à presença de quartzo e à predominância da fração silte, o que se reflete na classificação granulométrica do solo como ML - CL. De acordo com Mitchell e Soga (2005), materiais com predominância de sílica tendem a apresentar baixa atividade superficial, justificando o comportamento observado nos ensaios físicos, caracterizado por baixa coesão e reduzida plasticidade. Do ponto de vista tecnológico, essa característica é favorável à utilização do material como *filler* mineral, uma vez que partículas finas e ricas em sílica contribuem para o preenchimento de vazios e o melhor empacotamento das partículas em concretos e argamassas (Felekoglu *et al.*, 2005).

Os teores expressivos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  indicam a presença de argilominerais aluminossilicáticos, sobretudo a caulinita, cuja baixa atividade superficial e reduzida capacidade de adsorção de água explicam os baixos valores dos limites de Atterberg obtidos.

Os baixos teores de CaO identificados na análise de FRX indicam a ausência ou participação pouco significativa de fases carbonáticas, reforçando o caráter não calcário do material. Segundo Mehta e Monteiro (2008), materiais com baixo teor de cálcio tendem a atuar predominantemente como componentes inertes ou semirreativos, contribuindo principalmente por efeitos físicos, como micropreenchimento e efeito nucleante.

Quando comparado ao cimento CP-II Z 32, caracterizado por elevado teor de CaO, o material estudado apresenta composição química complementar, indicando que sua incorporação tende a influenciar principalmente a viscosidade, coesão e estabilidade da pasta, aspectos particularmente relevantes em aplicações como concreto auto-adensável (CAA). Estudos mostram que a adição de partículas finas em concretos pode melhorar a trabalhabilidade e reduzir a segregação, desde que adequadamente dosada (Felekoglu *et al.*, 2005).

Tabela 4 – Composição química do cimento CP-II Z 32, obtida por FRX

Constituinte	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF
Teor (%)	56,0	24,5	6,1	4,0	2,5	1,8	0,25	0,45	4,1

Fonte: Adaptado de Santos, Apolinário e Ribeiro (2013).

Apesar do elevado teor de SiO<sub>2</sub> (48,97%) favorecer a atuação do RPCP como *filler*, contribuindo para o empacotamento de partículas e a densificação da matriz cimentícia, os teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7,78%) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10,05%) podem impor restrições a determinadas aplicações. Segundo Neville (2016), a presença de materiais muito finos e com composição mineralógica específica pode influenciar diretamente a demanda de água, a trabalhabilidade e o desempenho do concreto, especialmente quando há substituições parciais em sistemas cimentícios. No contexto brasileiro, Isaia (2011) destaca que a composição química e a finura de adições minerais podem alterar a cinética de hidratação e, conseqüentemente, o comportamento no estado fresco e endurecido. Além disso, Helene e Terzian (1992) ressaltam que fatores relacionados à composição e às reações no meio cimentício podem comprometer a durabilidade, principalmente quando o material está exposto a ambientes agressivos, como

aqueles com presença de sulfatos. Dessa forma, recomenda-se que a incorporação do RPCP seja acompanhada de avaliação criteriosa por meio de ensaios de consistência, tempo de pega, resistência mecânica e indicadores de durabilidade, a fim de verificar sua viabilidade técnica antes da aplicação em sistemas cimentícios.

Embora tais teores sejam comuns em siltitos da Formação Longá, sua presença em níveis elevados pode influenciar o desempenho do concreto. Teores mais altos de  $Al_2O_3$  tendem a intensificar reações iniciais e podem aumentar a suscetibilidade ao ataque por sulfatos, em função da maior propensão à formação de fases expansivas, como a etringita (Helene; Terzian, 1992).

A caracterização química do RPCP indica teores relativamente elevados de  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  quando comparados aos valores comumente observados em adições minerais tradicionais utilizadas em concretos e argamassas. A ABNT NBR 12653:2014 não define limites específicos para esses óxidos de forma isolada, ou seja, sua presença em maiores proporções não implica, automaticamente, a reprovação do material.

Entretanto, a literatura apresenta composições típicas de materiais amplamente consolidados no setor, como cinzas volantes, escórias e fileres minerais, nos quais o  $Fe_2O_3$  geralmente ocorre em teores menores, enquanto o  $Al_2O_3$  aparece com maior destaque em adições de maior potencial reativo, como o metacaulim (Isaia, 2011; Dal Molin, 2005; Neville, 2016).

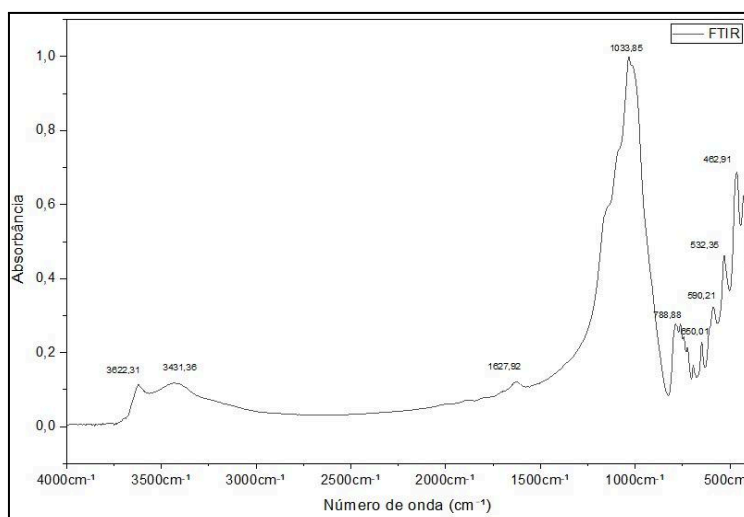
Assim, os teores de  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  observados no RPCP não impedem seu uso em matrizes cimentícias, mas indicam que sua aplicação deve ser acompanhada de ensaios complementares, a fim de verificar seu desempenho e possíveis impactos sobre propriedades no estado fresco, resistência mecânica e durabilidade.

### 5.2.2 Resultados do ensaio da Análise do FTIR

O espectro de FTIR do *filler*, evidencia bandas características de materiais minerais com predominância de silicatos e argilominerais, indicando que o resíduo é essencialmente inorgânico e apresenta baixa reatividade química imediata, como é visto na figura 12. As bandas observadas entre  $3.700$  e  $3.500\text{ cm}^{-1}$ , associadas às hidroxilas estruturais de argilominerais como a caulinita, bem como a banda intensa em torno de  $1033\text{ cm}^{-1}$ , atribuída às vibrações de estiramento Si–O–Si e Si–O–Al, são compatíveis com a presença de uma

matriz silico-aluminosilicatada típica de siltitos finos, conforme amplamente descrito na literatura especializada (Farmer, 1974; Madejová, 2003). A banda de baixa intensidade próxima a  $1.630\text{ cm}^{-1}$ , relacionada à deformação angular das ligações O–H da água adsorvida, indica reduzido teor de matéria orgânica, reforçando o caráter predominantemente mineral do material.

**Figura 12** - Bandas características do espectro de FTIR



Fonte: Autor (2025).

A análise integrada por FTIR, FRX e TGA indica que o Resíduo da Pedra Castelo do Piauí (RCP) é constituído predominantemente por fases silicosas e aluminosilicatadas, apresentando elevada estabilidade térmica. Os resultados de TGA evidenciam perda de massa gradual e contínua, atribuída principalmente à eliminação de água adsorvida e à desidroxilação dos argilominerais, seguida de estabilização da curva em temperaturas superiores a  $700\text{ °C}$ , sem eventos associados à decomposição de carbonatos. Essa interpretação é corroborada pelo espectro de FTIR, que não apresenta bandas características de carbonatos, indicando o caráter não calcário do material.

A presença de banda intensa em torno de  $1033\text{ cm}^{-1}$  no espectro de FTIR, associada às vibrações Si–O–Si e Si–O–Al, confirma a predominância de fases silicosas, em consonância com os resultados de FRX, que indicaram teor de  $\text{SiO}_2$  de 48,97%. De acordo com Neville (2016), materiais isentos de fases carbonáticas atuam predominantemente por mecanismos físicos, relacionados ao empacotamento e ao preenchimento de vazios, característica desejável para materiais empregados como *filler* em matrizes cimentícias.

Do ponto de vista térmico, a estabilidade do material até 1.000 °C, evidenciada pelas análises TGA e DTG, indica ausência de fases termicamente instáveis, qualificando o RPCP para aplicações que envolvem processos de aquecimento, como a indústria de cerâmica vermelha, além de sua utilização como adição mineral em concretos e argamassas (Callister; Rethwisch, 2016; Isaia, 2011).

Nesse contexto, os resultados de FRX assumem papel fundamental, uma vez que o teor de K<sub>2</sub>O superior a 2% indica a presença de álcalis capazes de elevar a alcalinidade da solução dos poros do concreto. Segundo Helene e Terzian (1992) e Isaia (2011), essa condição pode favorecer reações deletérias, tornando necessária a realização de ensaios de reatividade álcali-agregado antes da aplicação do material em concretos estruturais.

De forma geral, os resultados indicam que o comportamento do RPCP é governado predominantemente por mecanismos físicos, como rearranjo e empacotamento das partículas, o que é coerente com a elevada massa específica aparente seca obtida no ensaio Proctor (2,196 g/cm<sup>3</sup>). Assim, o material apresenta características favoráveis à densificação de matrizes minerais, reforçando seu potencial como *filler*, desde que avaliados aspectos de durabilidade e reatividade química.

### 5.2.3 Resultados do ensaio de TGA

A análise termogravimétrica (TGA) do resíduo da Pedra Castelo do Piauí, observada na figura 13, evidencia comportamento térmico típico de materiais silicosos e aluminosilicatados, interpretação corroborada pelo espectro de FTIR. Observa-se perda de massa gradual e contínua até 1.000 °C, sem eventos abruptos, indicando elevada estabilidade térmica.

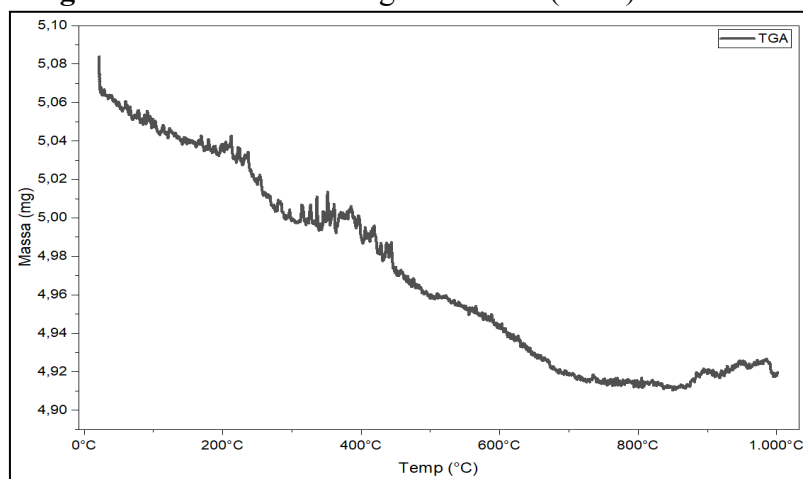
Na faixa entre 25 °C e 200 °C, a discreta perda de massa está associada à eliminação de água fisicamente adsorvida, o que é confirmado no FTIR pelas bandas em torno de 3622 cm<sup>-1</sup> e 3431 cm<sup>-1</sup>, atribuídas às vibrações de estiramento O–H. Entre 200 °C e 600 °C, ocorre a principal perda de massa, relacionada à desidroxilação de argilominerais, especialmente do grupo da caulinita, em concordância com a presença da banda intensa em 1033 cm<sup>-1</sup>, característica de ligações Si–O–Si e Si–O–Al.

A partir de aproximadamente 700 °C, a curva de TGA apresenta estabilização, indicando a conclusão das principais transformações térmicas. Esse comportamento é reforçado pela ausência de bandas de carbonatos no FTIR, geralmente localizadas entre 1400

e  $1500\text{ cm}^{-1}$ , o que confirma a inexistência de decomposição carbonática em altas temperaturas. As bandas observadas abaixo de  $800\text{ cm}^{-1}$  no FTIR estão associadas às vibrações de flexão Si–O, evidenciando a predominância de fases silicosas estáveis.

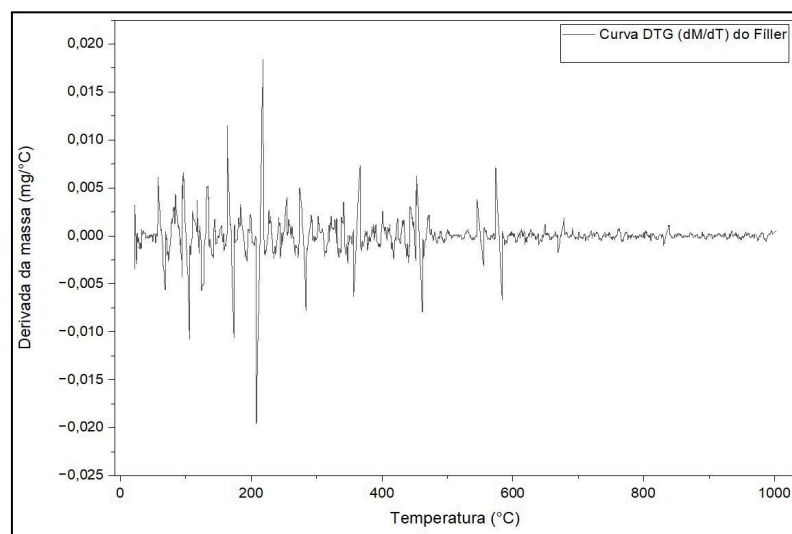
De forma integrada, os resultados de TGA e FTIR demonstram que as perdas de massa do RPCP estão relacionadas à remoção de água adsorvida e à desidroxilação de argilominerais, sem a presença de fases termicamente instáveis até  $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esse comportamento confirma a elevada estabilidade térmica do material, qualificando-o para aplicações que envolvem processos de aquecimento, como a indústria de cerâmica vermelha, além de reforçar seu potencial uso como adição mineral em matrizes cimentícias.

**Figura 13 - Análise Termogravimétrica (TGA)**



Fonte: Autor (2025).

**Figura 14 - Termogravimetria Derivada (DTG)**



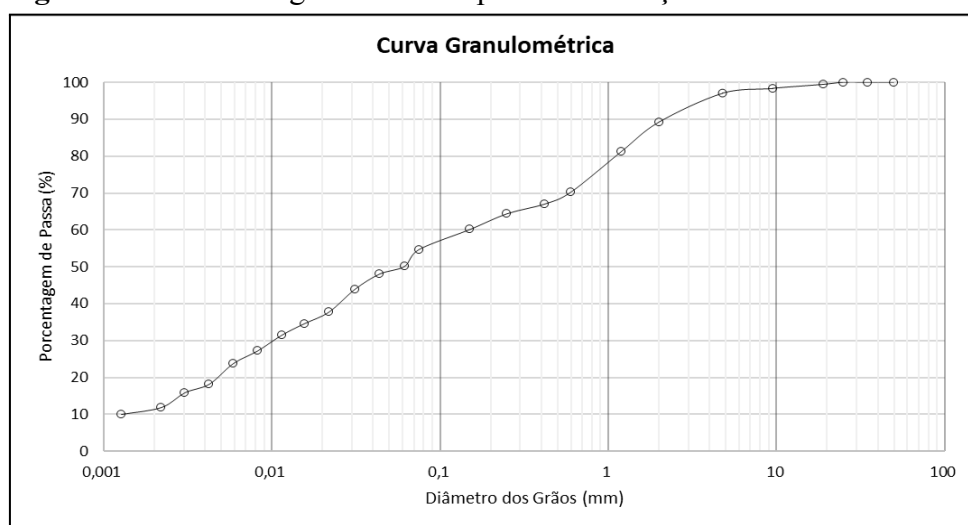
Fonte: Autor (2025).

Nesse contexto, a análise termogravimétrica derivada (DTG), apresentada na Figura 14, reforça essa interpretação ao evidenciar um perfil térmico típico de materiais com predominância de caulinita. Os picos de baixa intensidade observados até aproximadamente 200 °C estão associados à eliminação de água livre e fisicamente adsorvida, coerentes com a baixa capacidade de retenção de água observada em solos de baixa plasticidade. O evento térmico mais significativo entre 500 °C e 600 °C, correspondente à desidroxilação da caulinita, confirma a presença desse argilomineral, cuja estrutura pouco expansiva explica os baixos valores de plasticidade obtidos nos ensaios físicos. A estabilização da curva DTG acima de 700 °C, aliada à ausência de picos relacionados à decomposição de carbonatos, reforça o caráter não calcário do material e indica boa estabilidade térmica. Dessa forma, os resultados de granulometria, limites de Atterberg e análise DTG mostram-se consistentes entre si, evidenciando que o comportamento geotécnico do solo (ML-CL) está diretamente relacionado à sua composição mineralógica e às transformações térmicas observadas.

#### 5.2.4 Resultados do ensaio de Granulometria por sedimentação

A caracterização do solo foi realizada por meio de ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, bem como pela determinação dos Limites de Atterberg, conforme as normas técnicas vigentes, destacando a ABNT NBR 7181 (2016). A curva granulométrica obtida apresenta distribuição contínua dos tamanhos de grãos, indicando uma ampla faixa granulométrica, com participação significativa tanto de partículas grossas quanto de finos.

**Figura 15 - Curva de granulometria por sedimentação**



Fonte: Autor (2025)

A caracterização do solo foi realizada por meio dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, complementados pela determinação dos Limites de Atterberg, conforme a ABNT NBR 7181 (2016). A curva granulométrica obtida (Figura 15) evidencia uma distribuição contínua dos tamanhos de partículas, indicando a presença de frações grossas e finas ao longo de uma ampla faixa granulométrica.

Além da análise qualitativa da curva, foram determinados os diâmetros característicos D10 e D50, obtidos a partir dos dados do ensaio por sedimentação. O D10, correspondente ao diâmetro para o qual 10% do material é mais fino, apresentou valor de 0,001 mm, confirmando a presença significativa de partículas muito finas. Já o D50, que representa o diâmetro mediano da distribuição (50% mais fino e 50% mais grosso), foi estimado em aproximadamente 0,061 mm, valor coerente com a elevada participação da fração fina observada no material.

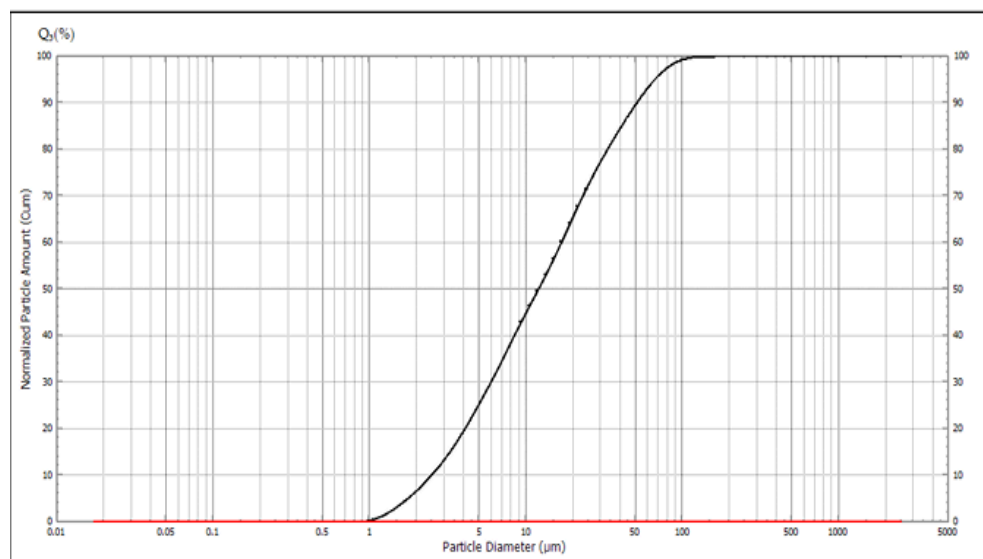
Os resultados do ensaio granulométrico indicaram que aproximadamente 55% do material é passante na peneira nº 200 (0,075 mm), caracterizando-o como solo predominantemente fino segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). A análise da fração fina por sedimentação evidenciou a presença de silte e argila, com predominância de silte, sendo estimados cerca de 21% de argila (< 0,005 mm) e 34% de silte (0,005 a 0,075 mm). Os Limites de Atterberg (LL = 25%, LP = 20% e IP = 5%) posicionam o solo na zona de transição do gráfico de plasticidade de Casagrande, indicando comportamento intermediário entre silte e argila de baixa plasticidade, resultando na classificação ML-CL.

Do ponto de vista de aplicação tecnológica, a elevada finura do material mostra-se favorável tanto ao seu uso como *filler* mineral em concretos e argamassas quanto à sua incorporação em massas cerâmicas. Conforme critérios apresentados por Mofati et al. (2013), resíduos com granulometria inferior a 0,149 mm são adequados para o setor construtivo, condição amplamente atendida pelo material analisado. Em matrizes cimentícias, essa finura contribui para o preenchimento de vazios, melhora do empacotamento das partículas e redução da porosidade capilar. De forma semelhante, em massas cerâmicas, o resíduo pode atuar como material fundente e de ajuste granulométrico, favorecendo a vitrificação, a densificação da peça após a queima e o controle da retração linear e da porosidade, funções análogas às desempenhadas por matérias-primas cerâmicas convencionais.

### 5.2.5 Resultados do ensaio de Granulometria a laser

Na Figura 16 podemos observar a curva de distribuição das partículas obtidas através do ensaio de granulometria a laser, tornando possível uma visualização mais detalhada da fração fina.

**Figura 16** - Curva da granulometria a laser



Fonte: Autor (2025).

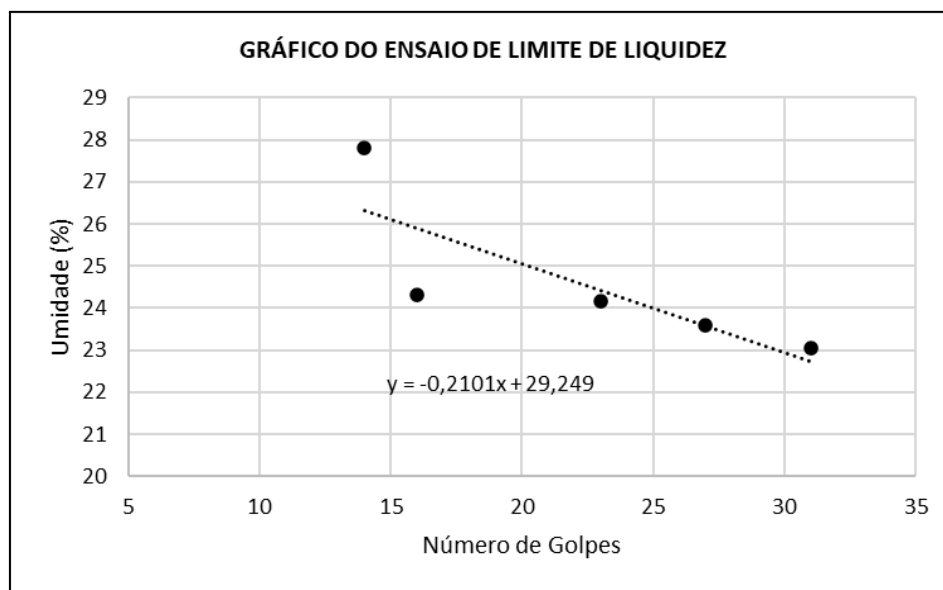
A análise granulométrica por difração a laser observada na curva da Figura 17, possibilitou uma avaliação mais detalhada da fração fina do material, especialmente na faixa micrométrica, confirmando a presença predominante de partículas de diâmetro reduzido, com maior concentração nas faixas de silte e argila. Observa-se que, embora os dois métodos de análise granulométrica apresentem diferenças inerentes aos princípios de medição, as curvas são coerentes entre si, uma vez que o ensaio a laser complementa o peneiramento e a sedimentação ao fornecer maior resolução para as partículas finas.

Dessa forma, os resultados indicam que o material possui distribuição granulométrica contínua, com predomínio da fração fina, sendo a granulometria a laser uma ferramenta complementar eficaz para a caracterização detalhada das partículas de menor diâmetro.

### 5.2.6 Resultados do ensaio de Limites de Atterberg

Na Figura 17 pode-se observar a curva de dispersão na escala linear dos dados obtidos no ensaio de limite de liquidez.

**Figura 17 - Curva de Limite de Liquidez**



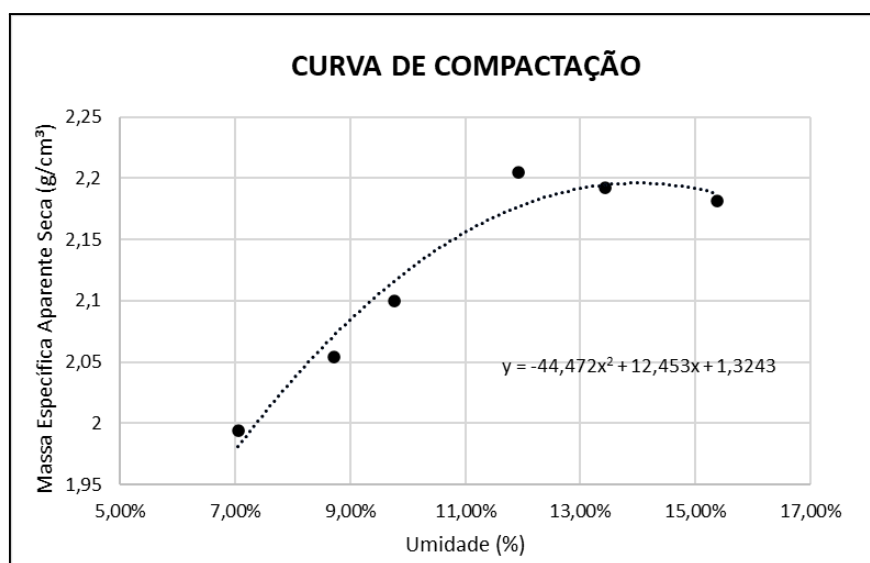
Fonte: Autor (2025).

- Limite de Liquidez (LL): 25%
- Limite de Plasticidade (LP): 20%
- Índice de Plasticidade (IP): 5%

Apesar dessa tendência, a baixa plasticidade observada é tecnicamente favorável para aplicações em matrizes cimentícias, uma vez que indica reduzida suscetibilidade a fenômenos de expansibilidade ou retração excessiva. Esse comportamento é corroborado pelos resultados da análise termogravimétrica (TGA), que indicam a predominância de caulinita como principal argilomineral presente. A presença desse mineral, caracterizado por baixa capacidade de expansão, assegura que a incorporação de finos ao sistema não comprometa a estabilidade dimensional do material final.

### 5.2.7 Resultados do ensaio de Proctor Normal

A tabela 18 apresenta o teor de umidade registrado a partir do ensaio de compactação. Sendo possível observar a umidade ótima aproximadamente no valor de 14% e massa específica aparente seca máxima de 2,196 g/cm<sup>3</sup>

**Figura 18** - Curva de Compactação - Ensaio de Proctor Normal

Fonte: Autor (2025).

A Figura 18 apresenta os resultados do ensaio Proctor, no qual a curva de compactação do resíduo, utilizado como *filler*, evidencia comportamento típico de materiais granulares finos. Observa-se que a massa específica aparente seca aumenta progressivamente com o acréscimo do teor de umidade até atingir um valor máximo, seguido de redução para umidades superiores. A partir da curva obtida, verifica-se que a massa específica aparente seca máxima ocorre para um teor de umidade em torno de 14%, correspondente à umidade ótima de compactação do material. Esse ponto representa a condição de maior densificação, associada ao melhor rearranjo das partículas e à consequente redução do índice de vazios.

A determinação da umidade ótima de compactação é um parâmetro fundamental para o controle tecnológico e para a definição das condições ideais de compactação em aplicações geotécnicas. O elevado valor de massa específica aparente seca máxima 2,196 g/cm³ obtido no ensaio atesta o potencial do RPCP para a formação de compósitos densos.

Tabela 5 - Teor de umidade

Ensaio de compactação						
<b>Amostra</b>	Resíduo <i>filler</i>					
<b>Massa do cilindro (g)</b>	2.376		<b>Volume (cm³)</b>		999	
	<b>Ponto 1</b>	<b>Ponto 2</b>	<b>Ponto 3</b>	<b>Ponto 4</b>	<b>Ponto 5</b>	<b>Ponto 6</b>

<b>MEAS (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,994	2,054	2,100	2,204	2,192	2,181
<b>Umidade (%)</b>	7,045	8,709	9,762	11,933	13,432	15,378

Fonte: Autor (2025).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados de sedimentação permitiu distinguir as frações silte e argila, considerando-se como argila as partículas com diâmetro inferior a 0,005 mm e como silte aquelas compreendidas entre 0,005 mm e 0,075 mm, conforme o SUCS. A partir da tabela de sedimentação, estimou-se o percentual passante em 0,005 mm em torno de 21%, correspondente à fração argila. Como o percentual passante na peneira nº 200 (0,075 mm) foi de aproximadamente 55%, obteve-se para a fração silte cerca de 34%, evidenciando predominância de silte em relação à argila. Além disso, a partir dos resultados de peneiramento, determinou-se que a fração areia (0,075–4,8 mm) corresponde a aproximadamente 42%, enquanto a fração de pedregulho é pouco representativa (~3%). Assim, observa-se que a maior fração do solo é a areia, seguida por silte e argila, sendo o teor de finos (silte + argila) ainda significativo, o que é compatível com os Limites de Atterberg (LL = 25% e IP = 5%) e justifica a classificação do solo como ML–CL.

A composição química obtida por FRX, com predominância de SiO<sub>2</sub> e teores significativos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, aliada aos baixos teores de CaO, indicou um material quimicamente estável e de caráter não calcário, compatível com aplicações em matrizes cimentícias e cerâmicas. Esses resultados estão de acordo com estudos que apontam a eficiência de *fillers* minerais no refinamento da microestrutura de concretos e argamassas.

As análises térmicas (TGA/DTG) evidenciaram um perfil característico de materiais com predominância de caulinita, com perdas de massa bem distribuídas e estabilidade térmica em temperaturas elevadas, confirmando a adequação do material para processos que envolvem tratamento térmico, como a produção de peças cerâmicas, além de sua compatibilidade com sistemas cimentícios. A ausência de eventos associados à decomposição de carbonatos reforça a previsibilidade do comportamento térmico do material quando inserido em sistemas mistos.

A integração dos resultados de FRX, FTIR e TGA confirma a predominância de fases silicosas estáveis e de argilominerais pertencentes ao grupo da caulinita, evidenciada pela

presença da banda característica em  $1033\text{ cm}^{-1}$  e pela perda de massa típica observada no intervalo de  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A inexistência de carbonatos nas análises indica elevada estabilidade térmica do material até  $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o que o qualifica não apenas para aplicação em concretos, mas também como um fundente estratégico para a indústria de cerâmica vermelha, com potencial para reduzir a temperatura de vitrificação e auxiliar no controle da contração linear das peças.

De maneira integrada, os resultados obtidos demonstram que o material apresenta atributos técnicos compatíveis com sua utilização como adição mineral, atuando como *filler* em concretos, argamassas, como matéria-prima secundária em formulações de massas cerâmicas. Assim, a caracterização realizada fornece embasamento técnico que sustenta a viabilidade de reinserção do material em diferentes cadeias produtivas, contribuindo para a valorização de resíduos e para a adoção de práticas alinhadas aos princípios da economia circular.

Apesar do desempenho técnico promissor, a aplicação do RPCP em larga escala deve considerar que os teores de ferro e alumina observados superam os valores usualmente recomendados pela literatura para aplicações estruturais de maior exigência. Esse aspecto, contudo, não inviabiliza sua utilização, mas ressalta a necessidade de realização de ensaios de reatividade álcali-sílica e de desempenho mecânico, visando à definição do teor ótimo de substituição e à garantia de conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por meio de uma destinação final ambientalmente adequada.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se a realização de estudos experimentais voltados à incorporação do material caracterizado em diferentes matrizes, avaliando seu desempenho em função de diferentes teores de substituição. Ensaios mecânicos, reológicos, de durabilidade e de desempenho térmico podem fornecer informações mais detalhadas sobre a influência do material nas propriedades finais dos compósitos. Adicionalmente, estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental, incluindo análises de ciclo de vida, podem contribuir para a consolidação do uso do material como alternativa sustentável, ampliando seu potencial de aplicação industrial em consonância com os princípios da economia circular.

### **6.1 Trabalhos Futuros**

- Realizar a moldagem e os ensaios de corpos de prova de concreto e argamassa, com substituição parcial do cimento ou do agregado miúdo pelo Resíduo da Pedra Castelo do Piauí (RPCP), em diferentes teores, como 5%, 10% e 15%.
- Executar ensaios específicos para avaliação da reatividade álcali-sílica (RAS), bem como da resistência dos materiais ao ataque por sulfatos e cloretos.
- Avaliar o desempenho do RPCP como material fundente e agente de controle de plasticidade em massas argilosas destinadas à fabricação de tijolos e telhas cerâmicas.
- Desenvolver um estudo de Análise de Ciclo de Vida (ACV), aliado a um balanço de custos logísticos, visando à viabilidade técnica, econômica e ambiental da implementação industrial do reaproveitamento do RPCP.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. M. **Caracterização de diferentes solos por meio da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- AGUIAR, M. C.; GADIOLI, M. C. B. **Cerâmica vermelha fabricada com resíduo de rochas ornamentais: teste industrial**. 2021.
- ALBUQUERQUE, O. R.; DEQUECH, V. Contribuição para a geologia do meio-norte, especialmente Piauí e Maranhão, Brasil. In: **CONGRESSO PAN-AMERICANO DE ENGENHARIA DE MINAS E GEOLOGIA**, 2., 1946, Petrópolis. *Anais...* Petrópolis, v. 3, p. 69–109, 1946.
- ALENCAR, C. R. A. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais**. Cachoeiro de Itapemirim: Instituto Euvaldo Lodi, 2013.
- ALLEN, T. **Particle size measurement**. v. 1: Powder sampling and particle size measurement. London: Chapman and Hall, 1981.
- ALMEIDA, K. M. et al. **Estudo bibliográfico da aplicação dos resíduos de rochas ornamentais**. 2023.
- AMARANTE, L. M.; YAMANE, L. H. Proposição de diretrizes considerando a vulnerabilidade ambiental para os Estudos de Impacto Ambiental de extração de rochas ornamentais. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 36240–36262, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1131** – Standard test method for compositional analysis by thermogravimetry. West Conshohocken, PA, 2020.
- ARRUDA, C. M. R. **Aplicação de resíduos de rochas ornamentais como carga para a fabricação de compósitos de matriz polimérica**. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 2. ed. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. 2. ed. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. 2. ed. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. 2. ed. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. 2. ed. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15012**: Rochas para revestimento de edificações – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 11358**: Plásticos – Análise termogravimétrica (TGA). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

BAYLÃO, Maria Carolina Campos; WANDER, Alcido Elenor. *Setor produtivo de rochas ornamentais: uma revisão sistemática da literatura*. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, e316111436278, 2022.

BENITES, V. M. et al. Caracterização da matéria orgânica do solo por FTIR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 1999.

BEZERRA, F. D. **Rochas ornamentais**. 2018. Disponível em: [https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/373/3/2018\\_CDS\\_60.pdf](https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/373/3/2018_CDS_60.pdf). Acesso em: 27 dez. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 27 dez. 2025.

CAMPOS, A. R. et al. Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais visando mitigação de impacto ambiental. In: **SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE**, 7., 2009, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: CETEM/MCTI, 2009.

CHIODI FILHO, C. **Situação do setor de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil – mercados interno e externo.** In: **SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE**, 5., 2005, Recife. *Anais...* Recife, 2005.

CHIODI FILHO, C. **Tipologia das rochas ornamentais.** 2018. Disponível em: <https://abirochas.com.br>. Acesso em: 27 dez. 2025.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Utilização de resíduos minerais como adições ao cimento Portland. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 262–277, 2009.

COUCEIRO, P. R.; SANTANA, H. Caracterização de argilas por espectroscopia no infravermelho. **Cerâmica**, São Paulo, v. 45, n. 293, 1999.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural.** Porto Alegre: UFRGS, 2005.

FARMER, V. C. **The infrared spectra of minerals.** London: Mineralogical Society, 1974.

FELEKOGLU, B.; ÖZTURAN, T.; TURANLI, L. Effect of limestone and silica fume on properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 8, p. 1458–1466, 2005.

FREITAS FILHO, A. F. **Caracterização geológica e tecnológica do arenito da Formação Cabeças (Pedra Mourisca) de Castelo do Piauí – PI.** 2018.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito como adição para a produção de concretos.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A. Reciclagem do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na construção civil. In: **SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE**, 2002, Recife. *Anais...* Recife, p. 179–189, 2002.

GUERRA, T. R. et al. **Reação álcali-agregado: verificação e combate da reatividade do agregado miúdo de quartzito.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, 2017.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de durabilidade do concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

MADEJOVÁ, J. FTIR techniques in clay mineral studies. **Vibrational Spectroscopy**, v. 31, p. 1–10, 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MESQUITA, E. et al. Avaliação das propriedades reológicas da pasta auto-adensável com incorporação de resíduo de serragem de rochas ornamentais. Fortaleza, 2009.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. 3. ed. New York: Wiley, 2005.

MOFATI, L. M. et al. **Estudo do aproveitamento de resíduos e rejeitos na cadeia produtiva de rochas ornamentais**. Rio de Janeiro, 2013.

MONTANI, C. XXXI Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo. 2021

MOTHÉ FILHO, H. F.; POLIVANOV, H.; LISB, C. G. Reciclagem dos resíduos sólidos de rochas ornamentais. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, p. 139–151, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OKAMURA, H. Self-compacting high-performance concrete. **Concrete International**, v. 19, n. 7, p. 50–54, 1997.

SANTOS, G. R. S.; APOLINÁRIO, E. C. A.; RIBEIRO, D. V. Influência da adição do resíduo de corte de mármore e granito na reologia das argamassas. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 1, 2013.

SILVEIRA, Leonardo Luiz Lyrio; VIDAL, Francisco Wilson Hollanda; SOUZA, Júlio César. *Beneficiamento de rochas ornamentais*. In: **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. Cap. 7, p. 329-398.

SOUZA SANTOS, Y. C. A História da Mineração Capixaba à luz dos Requerimentos Protocolados na Agência Nacional de Mineração. Revista Ifes Ciência, v. 9, n. 2, p. 01–12, 2023. Disponível em: <https://ojs.ifes.edu.br/index.php/ric/article/view/2015>, Acesso em: 29 de dezembro de 2025.

SOUZA SANTOS, Y. C. Disposição de estéreis de mineração no contexto da exploração de rochas ornamentais e revestimento no Estado do Espírito Santo. Revista Engenharia de Interesse Social, 2023. Disponível em: <https://revista.uemg.br/index.php/reis/article/view/7396>. Acesso em: 29 de dezembro de 2025.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. New York: Wiley, 1994.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.