



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANTONIO JOSE DO VALE AZEVEDO

**AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DO RESÍDUO DE PEDRA MORISCA COM ADIÇÃO
DE 30% EM SOLO DE CRATEÚS APLICADA EM SUB-BASE RODOVIÁRIA**

CRATEÚS

2026

ANTONIO JOSE DO VALE AZEVEDO

AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DO RESÍDUO DE PEDRA MORISCA COM ADIÇÃO DE
30% EM SOLO DE CRATEÚS APLICADA EM SUB-BASE RODOVIÁRIA

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^a. Luisa Gardênia Alves Tomé
Farias

Coorientador: Prof. Me. Jorge Luís Santos
Ferreira

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)

A986a Azevedo, Antonio Jose do Vale.

Avaliação geotécnica do resíduo de pedra morisca com adição de 30% em solo de crateús aplicada em sub-base rodoviária / Antonio Jose do Vale Azevedo. – 2026.
64 f.

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.

Coorientação: Prof. Me. Jorge Luis Santos Ferreira.

1. Resíduo de rocha ornamental. 2. Pedra Morisca. 3. Pavimentação rodoviária.

CDD 620

ANTONIO JOSE DO VALE AZEVEDO

AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DO RESÍDUO DE PEDRA MORISCA COM ADIÇÃO DE
30% EM SOLO DE CRATEÚS APLICADA EM SUB-BASE RODOVIÁRIA

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^a. Luisa Gardênia Alves Tomé
Farias

Coorientador: Prof. Me. Jorge Luís Santos
Ferreira

Aprovado em 22/01/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Luisa Gardênia Alves Tomé Farias (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Arthur Alysson de Lima Oliveira
Engenheiro Civil

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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por me conceder saúde, força e perseverança para superar todas as dificuldades e obstáculos e por iluminar meu caminho em cada fase desta graduação.

À minha família, meu porto seguro. Agradeço imensamente às minhas irmãs, Bruna e Brena, pelo companheirismo e incentivo constante. Um agradecimento mais do que especial à minha mãe, Ana Maria, cujo amor incondicional, sacrifício e apoio foram o combustível necessário para que eu chegasse até aqui. Este título também é seu.

À minha namorada, Bruna Luiza, meu muito obrigado pela paciência, pelo carinho e por acreditar em mim nos momentos de incerteza. Sua presença foi fundamental para a conclusão deste ciclo.

Aos meus amigos, pela parceria e pelos momentos compartilhados. Agradeço a Ana Beatriz, Fabricio, Kelviane e Maria Luísa, com quem tive a honra de dividir a rotina e os desafios da graduação. Um agradecimento especial à Iana, que, mesmo não tendo estudado comigo na universidade, esteve presente em todos os outros momentos, oferecendo um apoio e uma amizade indispensáveis.

À minha orientadora, Dr^a. Luisa Gardênia Alves Tomé Farias, pela paciência, pelo conhecimento compartilhado e pela orientação durante este trabalho. Sua orientação foi fundamental para o meu amadurecimento acadêmico e profissional, estendendo este agradecimento também aos membros da banca examinadora pelas valiosas contribuições.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho, o meu sincero obrigado.

RESUMO

A extração de blocos de pedra para a produção de chapas ornamentais gera grandes volumes de resíduos grosseiros, principalmente em razão da quebra de placas que não atendem aos padrões de comercialização. Esses resíduos são comumente acumulados no entorno de pedreiras e serrarias, ocasionando impactos ambientais e problemas de gestão de resíduos. Nesse contexto, este estudo analisa a caracterização geotécnica e a viabilidade de uso do resíduo da Pedra Morisca, também conhecida como Pedra Castelo Amarela, proveniente do município de Castelo do Piauí, com foco em sua aplicação em camada de sub-base de pavimentação rodoviária. A pesquisa justifica-se pela elevada geração de resíduos da indústria de rochas ornamentais e pela necessidade de alternativas sustentáveis para seu reaproveitamento. Foram coletadas amostras do resíduo e do solo característico da região de Crateús-CE, submetidas a ensaios laboratoriais de caracterização física, química e mecânica. Os ensaios incluíram análise granulométrica, limites de Atterberg, compactação e índice de suporte Califórnia (CBR), além de análises de FRX, FTIR e TGA. Os resultados indicaram que o resíduo apresenta comportamento predominantemente granular, baixa plasticidade e caráter mineral essencialmente inerte. A adição de 30% do resíduo ao solo reduziu o índice de plasticidade e a sensibilidade à variação de umidade, além de promover melhora do módulo de resiliência sob maiores níveis de confinamento. Contudo, os resultados de CBR evidenciaram redução da capacidade de suporte da mistura, não atendendo aos requisitos normativos para camadas de sub-base, embora apresente potencial para outras aplicações da construção civil, o que justificaria o seu estudo para pesquisas futuras.

Palavras-chaves: resíduo de rocha ornamental; pedra morisca; pavimentação rodoviária; caracterização geotécnica; sustentabilidade.

ABSTRACT

The extraction of stone blocks for the production of ornamental slabs generates large volumes of coarse waste, mainly due to the breakage of slabs that do not meet commercialization standards. These residues are commonly accumulated around quarries and stone-processing plants, causing environmental impacts and waste management problems. In this context, this study analyzes the geotechnical characterization and the feasibility of using waste from Pedra Morisca, also known as Pedra Castelo Amarela, originating from the municipality of Castelo do Piauí, with a focus on its application in road pavement sub-base layers. The research is justified by the high generation of waste from the ornamental stone industry and the need for sustainable alternatives for its reuse. Brazil stands out as one of the world's largest producers of ornamental stones, which intensifies this issue. Samples of the waste and of the characteristic soil from the Crateús-CE region were collected and subjected to laboratory tests for physical, chemical, and mechanical characterization. The tests included particle size analysis, Atterberg limits, compaction, and California Bearing Ratio (CBR), in addition to XRF, FTIR, laser granulometry, and TGA analyses. The results indicated that the waste exhibits predominantly granular behavior, low plasticity, and an essentially inert mineral character. The addition of 30% waste to the soil reduced the plasticity index and sensitivity to moisture variation, as well as improved the resilient modulus under higher confinement levels. However, the CBR results showed a reduction in the bearing capacity of the mixture, failing to meet the normative requirements for sub-base layers, although it shows potential for other civil construction applications, which justifies its investigation in future research.

Keywords: ornamental stone waste; morisca stone; road pavement; geotechnical characterization; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resíduos gerados durante a lavra e beneficiamento.....	22
Figura 2 - Localização da área de estudo do resíduo.....	24
Figura 3 - Croqui do Pavimento Flexível.....	25
Figura 4 - Etapas da metodologia da pesquisa.....	27
Figura 5 - Processo de extração da Rocha.....	28
Figura 6 - Pilha de Resíduos Grossos.....	28
Figura 7 - Escavação solo terreno na cidade de Crateús - CE.....	29
Figura 8 - Conjunto de peneiras.....	30
Figura 9 - Ranhura Fechada do ensaio do Limite de Liquidez.....	32
Figura 10 - Cilindro moldado.....	33
Figura 11 - Espectro de FTIR.....	41
Figura 12 - Análise Termogravimétrica (TGA).....	43
Figura 13 - Termogravimetria Derivada (DTG).....	44
Figura 14 - Curva Granulométrica por sedimentação do resíduo de Pedra Castelo Amarela (RCPA).....	46
Figura 15 - Curva Granulométrica do solo de Crateús.....	48
Figura 16 - Curva Granulométrica do solo de Crateús + Resíduo.....	49
Figura 17 - Curva Granulométrica do solo de Crateús + 30 % de RPCPA.....	50
Figura 18 - Análise granulométrica do Solo de Crateús + Resíduo em comparação com as faixas do DNIT.....	51
Fonte: Autoria Própria (2025).....	51
Figura 19 - Ensaio de limite de liquidez do Solo Crateús.....	52
Figura 20 - Ensaio de limite de liquidez da mistura de Solo Crateús + Resíduo.....	53
Figura 21 - Curva de compactação do Solo natural de Crateús.....	54
Figura 22 - Curva de compactação do Solo natural de Crateús + 30% de RPCPA.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de intervalos do SUCS.....	30
Tabela 2 - Composição química em FRX.....	37
Tabela 3 - Massa específica aparente seca (Solo Natural).....	54
Tabela 4 - Massa específica aparente seca máxima e umidade ótima (Solo Natural).....	54
Tabela 5 - Massa específica aparente seca e umidade (Mistura).....	55
Tabela 6 - Massa específica aparente seca máxima e umidade ótima (Mistura).....	55
Tabela 7 - Módulos de Resiliência médios do Solo e mistura.....	56
Tabela 8 - Resultados do CBR (%) e Expansibilidade (%).....	57

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
CBR	California Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia)
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DRX	Difração de Raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier)
HRB	Highway Research Board (Sistema de Classificação de Solos para Rodovias)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEAS	Massa Específica Aparente Seca
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCPA	Resíduo de Pedra Castelo Amarela
RPCPA	Resíduo de Pedra Castelo Amarela incorporado ao solo
SN	Solo Natural
SUCS	Unified Soil Classification System (Sistema Unificado de Classificação de Solos)
TGA	Thermogravimetric Analysis (Análise Termogravimétrica)

UFC Universidade Federal do Ceará

M30 Mistura de 30 %

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa.....	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivos Gerais.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1 Rochas ornamentais.....	19
3.1.1 <i>Tipos de rochas ornamentais</i>	20
3.1.2 <i>Produção de rochas ornamentais</i>	20
3.2 Resíduos gerados na produção de rochas ornamentais.....	21
3.3 Aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais.....	23
3.4 Local da extração do resíduo.....	23
3.5 Pavimentação.....	24
3.5.1 <i>Classificação dos pavimentos</i>	24
3.5.2 <i>Camadas constituintes</i>	25
4 METODOLOGIA	27
4.1 Materiais.....	28
4.1.1 <i>Resíduos da Pedra Morisca (Variação Amarela)</i>	28
4.1.2 <i>Solo Característico da região de Crateús-CE</i>	29
4.2 Métodos e ensaios.....	29
4.2.1 <i>Análise granulométrica</i>	29
4.2.2 <i>Limite de liquidez</i>	31
4.2.3 <i>Limite de Plasticidade</i>	32
4.2.4 <i>Compactação</i>	33
4.2.5 <i>CBR (California Bearing Ratio) e Expansibilidade</i>	34
4.2.6 <i>FRX</i>	34
4.2.7 <i>FTIR</i>	35
4.2.8 <i>Módulo de Resiliência</i>	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1 Fluorescência de Raios X (FRX).....	37
5.2 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	40
5.3 Análise Termogravimétrica (TGA).....	43
5.4 Análise da Granulometria.....	46
5.4.1 <i>Análise granulométrica do resíduo de Pedra Castelo Amarela (RCPA)</i>	46
5.4.2 <i>Análise granulométrica do resíduo do solo de Crateús</i>	47
5.4.3 <i>Análise granulométrica do resíduo do solo de Crateús + Resíduo</i>	49
5.5 Limites de Atterberg.....	51
5.6 Curva de compactação.....	53
5.7 Módulo de resiliência.....	56
5.8 Índice de Suporte Califórnia (CBR).....	57

6 CONCLUSÃO.....	60
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Desde o início do século XIX, as rochas ornamentais vêm sendo utilizadas pela sua aplicabilidade estética nas construções, tendo sua exploração intensificada a partir da década de 1970 com o avanço tecnológico nas lavras, o que possibilitou o aumento da produção e a descoberta de novas áreas com maior diversidade de padrões (VIDAL; PADILHA; ALMEIDA, 2006).

O Brasil é um dos principais produtores mundiais de rochas ornamentais, com destaque para o mármore e o granito. No período de 2015 a 2019, o país manteve-se em quarto lugar, atrás apenas da China, Índia e Turquia. Em 2021, o Brasil chegou a faturar US\$ 1,34 bilhão com as exportações de rochas ornamentais (BRASIL, 2022).

A retirada de blocos de rocha para a produção de chapas, acaba gerando inúmeras pilhas de resíduos grosseiros devido a quebra de placas não se enquadrarem no padrão de comercialização, tais resíduos acabam se acumulando aos arredores das pedreiras e/ou serrarias. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305/2010 (Brasil, 2010), implementa a necessidade de uma gestão adequada para os resíduos, buscando soluções para a implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto, em etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final.

A avaliação da produção para venda, da geração de resíduos e da dinâmica de aproveitamento e direcionamento dos mesmos serão os focos deste estudo, com o objetivo de demonstrar um maior entendimento de como a lavra da Pedra Mourisca pode aprimorar seu aproveitamento, colaborando com fatores ambientais.

1.1 Justificativa

O presente trabalho apresenta a viabilidade do uso do resíduo da Pedra Mourisca como alternativa de implemento na camada de sub-base na pavimentação asfáltica, com a finalidade de direcionamento do material produzido.

Observando a crescente procura por rochas ornamentais no mercado interno no Brasil e no externo, se torna imprescindível encontrar meios para destinar as grandes quantidades de resíduos gerados nas lavras de produção. A maioria dos resíduos de rochas ornamentais gerados pela indústria brasileira carece de descarte adequado ou de um processo de reaproveitamento bem definido. Segundo ABIROCHAS (2023) o país tem produção estimada de 10 Mt de rochas ornamentais e de revestimento (7% da produção mundial).

Apesar da existência da Lei de Crimes Ambientais (Brasil, 1998), muitos desses resíduos são descartados de forma irregular, formando grandes pilhas de pedras que ficam expostas às intempéries, sem um destino final apropriado.

Dentre as possíveis alternativas para o aproveitamento de resíduos derivados do processo produtivo das rochas ornamentais na construção civil, é destaque a utilização em projetos de pavimentação rígida ou flexível que em suas camadas granulares localizadas abaixo da camada de revestimento, as quais servem para absorver e distribuir as cargas do tráfego para o subleito, também denominado terreno natural, diminuindo as tensões aplicadas e evitando deformações permanentes (DNIT, 2006).

O agregado selecionado deve atender aos requisitos tecnológicos estabelecidos pelas normas aplicáveis à pavimentação, incluindo ensaios laboratoriais e verificações práticas *in situ*, considerando-se a disponibilidade dos resíduos provenientes das jazidas e a distância até o local de aplicação. A jazida situada em Castelo do Piauí – PI, pertencente à empresa ECB Rochas Ornamentais do Brasil, encontra-se a aproximadamente 114 km do município de Crateús – CE, cidade escolhida para análise das camadas granulares para o estudo de sua possível utilização nas camadas de pavimentação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Realizar a caracterização de resíduos de extração e beneficiamento de Pedra Castelo para verificação da viabilidade técnica em camadas de sub-base de pavimentos rodoviários.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar física, química e mecanicamente o resíduo sólido grosseiro proveniente do beneficiamento da Pedra Morisca (RPCPA).
- Caracterizar geotecnicamente o solo natural do município de Crateús, por meio de ensaios laboratoriais normalizados.
- Investigar a viabilidade técnica e o comportamento geotécnico de uma mistura de solo com a incorporação de 30% de resíduo (RPCPA)
- Analisar a influência da adição do resíduo nos parâmetros de plasticidade, compactação e suporte mecânico do solo.
- Determinar a viabilidade técnica do uso do resíduo em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, com base em critérios normativos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados aspectos e fundamentos sobre as rochas ornamentais, a geodiversidade do estado do Piauí e dados econômicos sobre o setor de produção de rochas ornamentais e estudos de implementação do resíduo na pavimentação.

3.1 Rochas ornamentais

Segundo a NBR 15012 (ABNT, 2013), rocha ornamental é definida como um “material pétreo natural utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária”. Esse conceito abrange materiais de origem ígnea, metamórfica e sedimentar que, após processos de extração e beneficiamento, apresentam características estéticas e técnicas adequadas ao uso na construção civil e em aplicações decorativas.

De acordo com Chiodi Filho (2003), as rochas ornamentais distinguem-se de outros materiais pétreos principalmente pelo seu valor agregado, associado às etapas de serragem, polimento e acabamento superficial, que evidenciam atributos como cor, textura e padrão visual. Além do aspecto estético, o autor destaca que propriedades físicas e mecânicas, como resistência, durabilidade e baixa porosidade, são fundamentais para garantir o desempenho do material ao longo de sua vida útil.

Vidal, Padilha e Almeida (2006) ressaltam que o avanço tecnológico nos métodos de extração e beneficiamento permitiu a ampliação do portfólio de rochas ornamentais disponíveis no mercado, bem como a melhoria da qualidade dos produtos finais. Segundo os autores, essa evolução contribuiu para o aumento da competitividade do setor e para a diversificação das aplicações, incluindo fachadas, pisos, revestimentos estruturais e elementos arquitetônicos especiais.

Complementarmente, Costa et al. (2018) afirmam que o crescimento da produção de rochas ornamentais tem gerado volumes significativos de resíduos sólidos ao longo da cadeia produtiva, desde a lavra até o beneficiamento final. Esses resíduos, quando não adequadamente gerenciados, podem ocasionar impactos ambientais relevantes, o que reforça a importância do desenvolvimento de alternativas para sua reutilização em obras de infraestrutura, como camadas de pavimentos rodoviários.

3.1.1 Tipos de rochas ornamentais

No setor de produção de rochas ornamentais, há uma grande diversidade de denominações comerciais, sendo frequente que rochas geologicamente distintas sejam comercializadas sob uma mesma designação (Freacá, 2013). Essas rochas são classificadas comercialmente em “mármore” e “granito”. Paralelamente a essa classificação mercadológica, existe a classificação litológica, que agrupa as rochas em silicáticas, carbonáticas e silicosas (Chiodi, 2018).

As rochas silicáticas são compostas majoritariamente por minerais silicáticos e silicosos, como feldspatos, micas e quartzo, englobando materiais comercialmente conhecidos como granitos, pegmatitos e xistos (Chiodi, 2018).

As rochas carbonáticas apresentam como principais constituintes minerais a calcita e a dolomita, podendo conter, em menores proporções, minerais silicáticos e silicosos. Comercialmente, esse grupo inclui os mármore, travertinos, calcários, ônix e alabastros (Chiodi, 2018).

Por sua vez, as rochas silicosas são formadas essencialmente por quartzo ou sílica amorfa, com pequenas quantidades de outros minerais, abrangendo materiais como quartzitos, metaconglomerados e quartzo (Chiodi, 2018).

3.1.2 Produção de rochas ornamentais

A produção brasileira de rochas ornamentais tem apresentado expressivo crescimento e consolidação ao longo das últimas décadas, posicionando o país como um dos principais protagonistas do mercado mundial. Esse desempenho está diretamente associado à ampla diversidade geológica existente no território nacional, considerada a maior geodiversidade de rochas ornamentais do mundo, fator que confere ao Brasil elevada competitividade no setor (CHIODI FILHO, 2021a).

No âmbito produtivo, estudos realizados pelo Instituto Metas (2002), para o então Ministério da Ciência e Tecnologia, identificaram a existência de 18 aglomerações produtivas vinculadas ao setor de rochas ornamentais e de revestimento, envolvendo atividades de lavra em 10 estados e cerca de 80 municípios. De forma mais abrangente, aproximadamente 370 municípios brasileiros registram arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) relacionada à extração de rochas ornamentais, evidenciando a distribuição territorial da atividade no país.

A distribuição espacial dos polos produtivos de rochas ornamentais no Brasil mantém

uma forte concentração na região Sudeste, evidenciando a proximidade estratégica entre os centros extrativos e os principais mercados consumidores nacionais e internacionais (ABIROCHAS, 2018). Embora a configuração desses polos tenha se mantido estável desde o início dos anos 2000, observa-se uma intensificação da lavra em frentes específicas. No estado de Minas Gerais, destacam-se as extrações de pegmatitos, granitos exóticos e quartzitos no norte mineiro, enquanto a Bahia consolida sua produção em mármore e quartzitos maciços. Adicionalmente, as regiões Nordeste (Ceará e Rio Grande do Norte) e Norte despontam como fronteiras de expansão, especialmente no segmento de rochas exóticas e beneficiamento primário em áreas da Amazônia Legal (Chiodi filho, 2014)

Em termos quantitativos, a produção nacional de rochas naturais destinadas à ornamentação e ao revestimento foi estimada em aproximadamente 9,0 milhões de toneladas no ano de 2020, mantendo-se em patamares semelhantes aos registrados em 2018 e 2019 (ABIROCHAS, 2020). Essa produção abrange uma ampla variedade litológica, incluindo granitos, pegmatitos e outras rochas silicáticas, bem como mármore, travertinos, ardósias, quartzitos maciços e foliados, basaltos, gabros, serpentinitos, pedra-sabão, pedra-talco, calcários, metaconglomerados, cherts, arenitos e xistos, entre outros.

Estima-se a existência de pelo menos 1.500 frentes de lavra ativas no país, predominantemente a céu aberto e em maciços rochosos, responsáveis pela oferta de mais de 1.200 variedades comerciais de rochas ornamentais destinadas aos mercados interno e externo. A diversidade de materiais, aliada à crescente demanda internacional, tem impulsionado as exportações brasileiras, que evoluíram de aproximadamente US\$ 200 milhões em 1999 para valores superiores a US\$ 1 bilhão a partir da década de 2010, com recorde histórico de US\$ 1,34 bilhão em 2021 (CENTROROCHAS, 2022).

3.2 Resíduos gerados na produção de rochas ornamentais

As rochas ornamentais possuem aplicações amplas, que incluem placas funerárias, pisos, revestimentos de paredes, entre outras. O principal setor consumidor desses materiais ainda é a construção civil, que impulsiona tanto o comércio interno quanto o de exportação. A indústria das rochas ornamentais vem apresentando crescimento em seu mercado e, conseqüentemente, um aumento proporcional em sua produção. Com esse avanço, observa-se também o crescimento das pilhas de rejeitos, que geralmente são depositados de forma inadequada (TAGUCHI *et al.*, 2014).

O grande desafio consiste no aproveitamento dos resíduos, uma vez que, com o contínuo crescimento do comércio, observa-se o aumento de pilhas já existentes. Durante a

cadeia produtiva das rochas ornamentais, são gerados diversos tipos de resíduos. No caso da rocha extraída no município de Castelo do Piauí, ocorre ainda a diversificação de cores devido a oxidação ao longo do tempo, especialmente quando expostos à umidade e outros agentes intempéricos, causando o surgimento de manchas e mudanças de cor (Rodrigues, 2024). No processo de extração, há a geração de fragmentos que não possuem valor comercial, além da produção de pó durante o corte dos blocos, o qual se transforma em uma lama que, após a evaporação da água, resulta no acúmulo de um material particulado de granulometria fina, como é vista na sequência da Figura 1.

Figura 1 - Resíduos gerados durante a lavra e beneficiamento



Fonte: Autor (2025)

A NBR 10004 (ABNT, 2024), define que “A classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido”. Podendo ainda receber a diferenciação de resíduos que afetam a saúde pública e ao meio ambiente.

Em alguns casos, as pequenas empresas costumam alocar os resíduos no entorno da lavra, o que provoca impactos ambientais no solo da área explorada. Os resíduos de maiores dimensões são gerados principalmente na fase de beneficiamento primário, etapa em que ocorre a retirada e a quebra dos blocos, visto que esse processo ainda apresenta baixo grau de mecanização, resultando em elevado desperdício de material (VIDAL; PADILHA; ALMEIDA, 2006).

3.3 Aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais

O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) é uma instituição de pesquisa vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), criada em 1978. Sua missão consiste em desenvolver tecnologias sustentáveis para o aproveitamento dos recursos minerais brasileiros, com foco na inovação e no suporte à indústria mineral e metalúrgica do país. Desde 1997, o CETEM promove programas de apoio às empresas que atuam na extração e no beneficiamento de rochas ornamentais, com ênfase na produtividade e na redução de perdas. A diminuição desses desperdícios tem sido estudada buscando alternativas como mudanças de rota, utilização de máquinas mais eficientes e aprimoramento das etapas de processamento (Campos *et al.*, 2009).

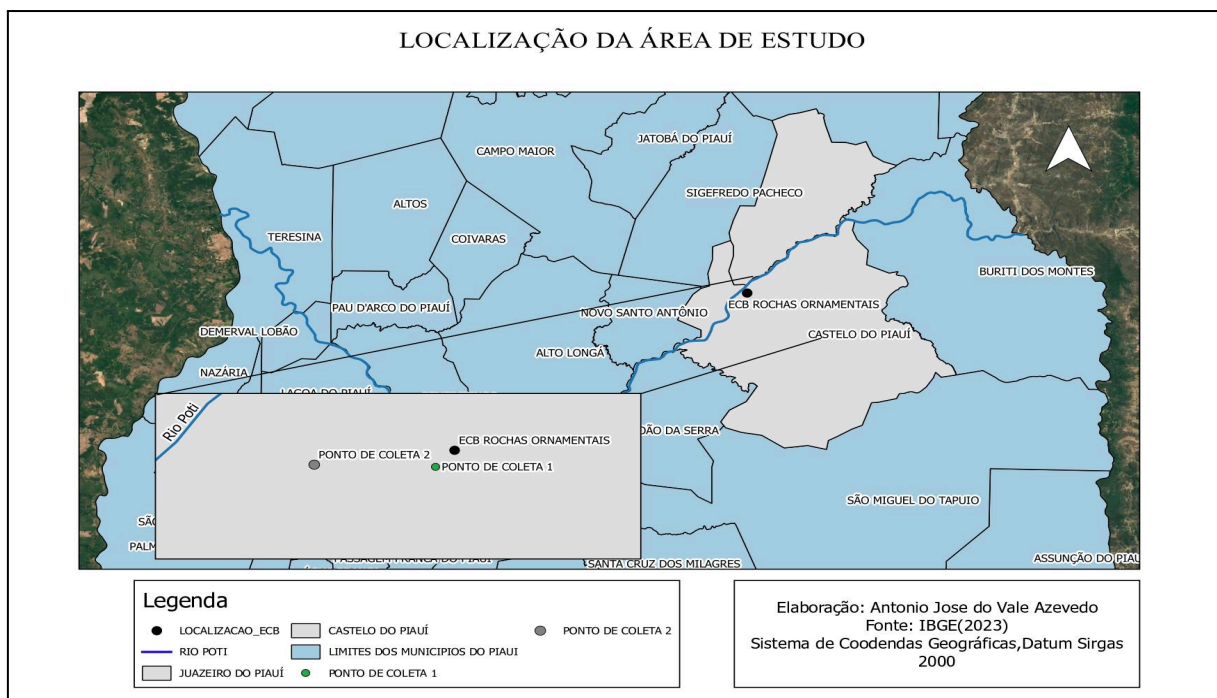
Os desperdícios podem variar entre 65% e 75%, dependendo das etapas de extração e acabamento. A maior parte desses resíduos é classificada como material grosseiro, acumulado nos arredores das áreas de lavra. Esses resíduos poderiam ser submetidos a processos de reaproveitamento, como utilização em aterros devidamente licenciados ou aplicação como agregados na construção civil, em conjunto com britas 0 e 1 (Carlete, 2016).

3.4 Local da extração do resíduo

O estado do Piauí está localizado na região Nordeste do Brasil e possui uma extensão territorial de aproximadamente 251.755,499 km² (IBGE, 2024). Segundo o Censo Demográfico de 2022, sua população é de 3.271.199 habitantes (IBGE, 2022), com estimativa de alcançar 3.384.547 habitantes em 2025 (IBGE, 2025), o que o posiciona como a terceira maior unidade federativa do Nordeste. O estado limita-se com o Maranhão a oeste, com o Ceará e Pernambuco a leste, e com a Bahia e o Tocantins ao sul. O Piauí conta ainda com um litoral de cerca de 66 quilômetros, considerado o menor do país (Flipar, 2025), situado entre os Lençóis Maranhenses e a Praia de Jericoacoara, e banhado pelo Oceano Atlântico. Essa configuração territorial confere ao estado uma grande diversidade de paisagens naturais, que influenciam diretamente suas dinâmicas socioeconômicas.

A ECB Rochas Ornamentais do Brasil LTDA. destaca-se como uma das empresas pioneiras e de maior relevância no setor de extração e beneficiamento de rochas ornamentais no estado do Piauí. Sua unidade operacional está localizada no município de Castelo do Piauí, na região da Fazenda Bonito, estando inserida na área de estudo considerada neste trabalho, conforme ilustrado na Figura 02 (Alves, 2010; Brito, 2015).

Figura 2 - Localização da área de estudo do resíduo



Fonte: Autor (2025)

A economia piauiense é diversificada e composta por atividades como comércio, indústria, agricultura, pecuária, turismo e extrativismo. O setor comercial exerce forte influência na economia local devido à variedade de serviços ofertados, destacando-se os segmentos de vestuário, calçados e comércio automotivo. O setor industrial concentra-se principalmente na fabricação de produtos químicos, têxteis e bebidas, destacando-se empresas como a Bunge, de atuação transnacional, e a fábrica de cimento Nassau (IBGE, 2022).

3.5 Pavimentação

O Transporte Rodoviário de Cargas (TRC) desempenha papel fundamental na logística e no desenvolvimento econômico do Brasil, sendo responsável, em 2016, pelo escoamento de aproximadamente 485.625 milhões de toneladas por quilômetro útil e pela geração de mais de 1,5 milhão de postos de trabalho diretos (CNT, 2019).

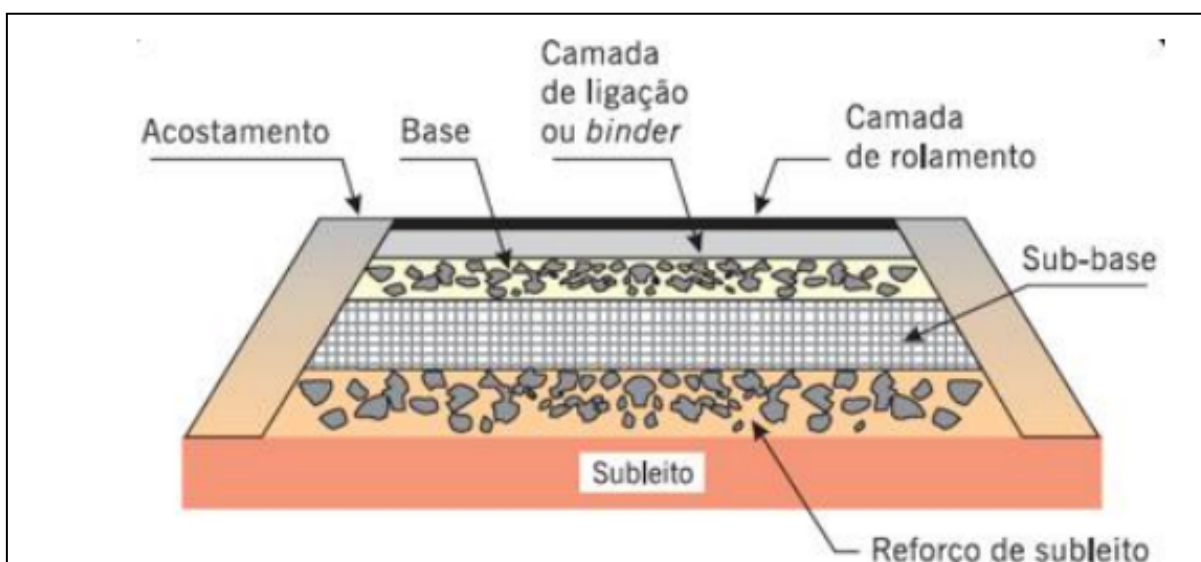
3.5.1 Classificação dos pavimentos

Os pavimentos podem ser classificados, de modo geral, em dois grupos principais: pavimentos rígidos e pavimentos flexíveis. Entretanto, alguns autores ampliam essa classificação, considerando um terceiro grupo, denominado pavimentos semi-rígidos, que apresenta características intermediárias entre os dois primeiros (Brasil, 2006).

3.5.2 Camadas constituintes

A pavimentação rodoviária é definida como uma estrutura composta por várias camadas de espessuras finitas, executadas a partir das atividades de terraplenagem e compactação, com a finalidade de resistir às solicitações do tráfego e às condições climáticas regionais, proporcionando aos usuários melhores condições de rolamento, conforto, economia e segurança (Bernucci *et al.*, 2006). Nesse contexto, conforme destacam Medina e Motta (2005), a camada superior, denominada revestimento, é responsável por resistir diretamente às ações do tráfego e distribuí-las de forma adequada às camadas inferiores. As camadas de subleito, reforço do subleito, sub-base e base possuem papel estrutural fundamental, uma vez que atuam na limitação das tensões e deformações transmitidas à estrutura do pavimento, garantindo seu desempenho e durabilidade, as camadas são observadas na Figura 3 abaixo.

Figura 3 - Croqui do Pavimento Flexível



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2010

- Base

A base é a camada do pavimento que será exposta aos esforços verticais provenientes do tráfego de veículos (Pessoa Júnior, 2014), assim, tendo como principal foco atuar como uma camada de transição de alta rigidez, impedindo que qualquer tipo de deformação atinja o solo natural (subleito).

- Sub-base

A sub-base é a camada situada entre o subleito (ou seu reforço) e a base do pavimento, sendo utilizada principalmente em rodovias submetidas a tráfego intenso (Pinto, 2002). Sua

execução pode ser dispensada quando o subleito apresenta boas condições de suporte. Além da função estrutural, a sub-base contribui para a drenagem do pavimento e impede a intrusão do solo do subleito na base. Conforme Senço (2008), trata-se de uma camada complementar à base, empregada quando não é técnica ou economicamente viável executá-la diretamente sobre o subleito, devendo o material utilizado apresentar características tecnológicas superiores às do reforço do subleito.

- Subleito

O subleito, ou também denominado solo natural é a camada que serve de apoio para receber o pavimento asfáltico, sendo assim, o responsável pelo recebimento e transmissão dos esforços e tensões provenientes do tráfego e peso próprio para o terreno. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2022), o subleito deve apresentar características adequadas de resistência, estabilidade volumétrica e durabilidade, de modo a garantir o desempenho satisfatório da estrutura ao longo de sua vida útil.

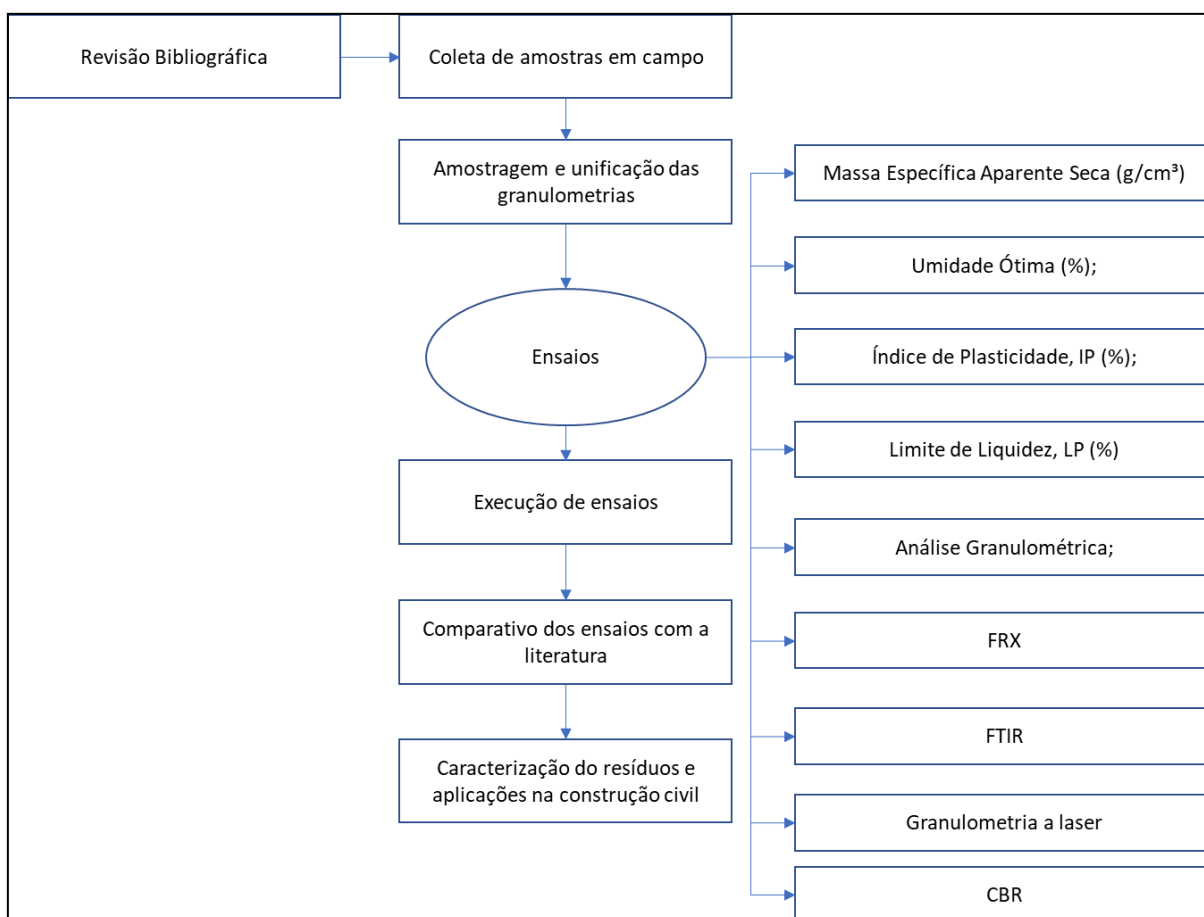
- Reforço de subleito

De acordo com Senço (2008), o reforço do subleito consiste em uma camada de espessura uniforme, executada sobre a regularização do subleito, cuja função é complementar a sub-base. Essa camada apresenta características tecnológicas superiores às da regularização do subleito, porém inferiores às da sub-base. O autor também ressalta que o reforço do subleito é empregado, sobretudo, em pavimentos de grande espessura, tendo como principal objetivo a redução da espessura da camada de sub-base. Sua utilização não é obrigatória, sendo condicionada às propriedades dos materiais disponíveis, ao volume de tráfego previsto no projeto e a outros fatores de natureza técnica e operacional.

4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho pode ser observada na Figura 4 apresenta um fluxograma que descreve as etapas de desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o estudo das rochas ornamentais e sobre o quantitativo de resíduos gerados, bem como das causas que levam à formação das pilhas de resíduos. Em seguida, foi realizada a busca por uma lavra que apresentasse essas pilhas e que pudesse fornecer informações sobre o processo de beneficiamento adotado. Posteriormente, efetuou-se a caracterização do material estudado. Por fim, realizou-se um comparativo com pesquisas já existentes, a fim de selecionar a alternativa mais econômica e viável para o seu aproveitamento, evitando o descarte inadequado no meio ambiente.

Figura 4 - Etapas da metodologia da pesquisa



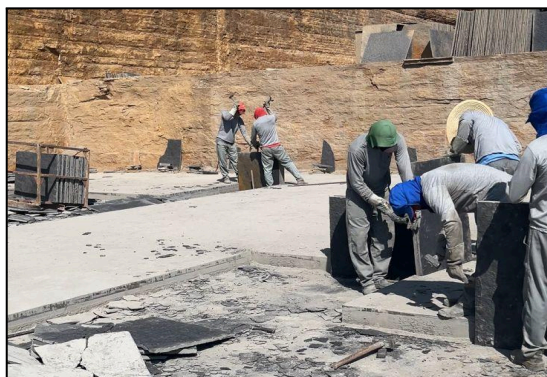
Fonte: Autor (2025)

4.1 Materiais

4.1.1 Resíduos da Pedra Morisca (Variação Amarela)

O resíduo utilizado na pesquisa foi coletado na mineradora ECB Rochas Ornamentais, situada na Fazenda Bonito, em Castelo do Piauí – PI. A metodologia de extração da rocha empregada no local é de caráter rudimentar, utilizando predominantemente ferramentas manuais, como ponteiros e marretas (Figura 5).

Figura 5 - Processo de extração da Rocha



Fonte: Autor (2025)

Os resíduos resultantes dessa atividade minerária manifestam-se tanto na forma de pó quanto como resíduos de granulometria mais grosseira, os quais são dispostos em pilhas acumuladas nas proximidades da área de extração (Figura 6).

Figura 6 - Pilha de Resíduos Grosseiros



Fonte: Autor (2025)

4.1.2 Solo Característico da região de Crateús-CE

A amostra de solo foi coletada na região dos sertões de Crateús, Ceará, nas proximidades da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Crateús, situada na Av. Professora Machadinho Lima. A coleta foi realizada a uma profundidade de 1,5 metros (figura 7), com o objetivo de analisar as camadas internas do solo e obter um solo com características mais homogêneas.

Figura 7 - Escavação solo terreno na cidade de Crateús - CE



Fonte: Autor (2025)

4.2 Métodos e ensaios

4.2.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica dos solos foi realizada conforme a NBR 7181:2024, com o objetivo de determinar a distribuição do tamanho das partículas por meio dos ensaios de peneiramento e sedimentação. Inicialmente, as amostras do solo natural e da mistura com 30% de resíduo foram separadas em frações grossas e fina por meio da peneira nº 10 (2,0 mm). A fração grossa foi analisada por peneiramento com peneiras padronizadas conforme a Figura 08, enquanto a fração fina foi avaliada por sedimentação, com base na velocidade de deposição das partículas em suspensão. Os resultados obtidos permitiram a classificação dos materiais segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), com base nos critérios e definições estabelecidos pela norma ASTM D2487, conforme apresentado na Tabela 01:

Tabela 1 - Tabela de intervalos do SUCS

Pedregulho	76,2 mm - 4,76 mm
Areia grossa	4,75 mm - 2,00 mm
Areia média	2,00 mm - 0,42 mm
Areia fina	0,42 mm - 0,074 mm
Silte	0,075 mm - 0,005 mm
Argila	< 0,005 mm

Fonte: Autor (2025)

Figura 8 - Conjunto de peneiras



Fonte: Autor (2025)

Após essa etapa, retira-se uma amostra de 120 g, obtida a partir do material passante na peneira n° 10 (fração fina), conforme orienta a NBR 6457, para a realização do ensaio de sedimentação. Já o material retido na peneira n° 10 é utilizado integralmente, sendo depositado novamente na peneira e lavado em água corrente até que toda a fração fina remanescente seja removida. Após a completa eliminação dos finos, a fração grossa é

armazenada e levada à estufa para secagem, em temperatura de 105 °C, até que se obtenha sua secagem total.

4.2.2 Limite de liquidez

O ensaio é de grande importância para classificação e identificação dos solos finos, sendo um dos critérios para classificação que é usualmente utilizado engenharia, como o SUCS (Unified Soil Classification System) e o HRB (Highway Research Board), utilizados na pavimentação.

O ensaio de Limite de Liquidez (LL) foi realizado com base na ABNT NBR 6459:2016, a qual estabelece que o procedimento deve ser executado em ambiente que minimize a perda de umidade do material, sendo recomendada a realização do ensaio em local climatizado. A preparação da amostra seguiu os procedimentos descritos na ABNT NBR 6457:2016.

Inicialmente, o material foi colocado em um recipiente de porcelana, ao qual foram adicionadas pequenas quantidades de água destilada. Com o auxílio de uma espátula, a amostra foi homogeneizada até a obtenção de uma pasta uniforme. Em seguida, o material foi transferido para a concha do aparelho de Casagrande, formando-se uma camada com aproximadamente 10 mm de espessura no ponto de maior profundidade. Posteriormente, utilizando-se um cinzel padronizado, foi aberta uma ranhura com aproximadamente 2 mm de largura, sendo então aplicados golpes no equipamento até o fechamento da ranhura ao longo de um comprimento especificado, conforme ilustrado na Figura 09.

Figura 9 - Ranhura Fechada do ensaio do Limite de Liquidez



Fonte: Autor (2025)

Após o fim do procedimento, e com o fechamento da ranhura de 13 mm de comprimento, uma pequena quantidade do material que se uniu após o golpeamento é coletada para determinar a umidade seguindo os padrões normativos. O processo é executado com a determinação de 5 pontos com um intervalo de 15 a 35 golpes, assim, é possível construir o gráfico do Limite de Limite de liquidez (LL), ele é formado ao se plotar o Teor de Umidade (w) no eixo vertical contra o Número de Golpes (N) no eixo horizontal (este, geralmente em escala logarítmica) para determinação do LL por meio do gráfico.

4.2.3 Limite de Plasticidade

Para iniciar o ensaio de Limite de Plasticidade (LP), a amostra foi preparada conforme as orientações da ABNT NBR 6457, garantindo representatividade e condições laboratoriais adequadas. Em seguida, a amostra foi colocada em uma cápsula de porcelana, onde se adicionam pequenas quantidades de água destilada, amassando e revolvendo continuamente com espátula até obter uma pasta homogênea. De acordo com a ABNT NBR 7180:2025, o tempo de homogeneização recomendado está compreendido entre 15 e 30 minutos, sendo o maior intervalo aplicado para solos de maior teor de argila.

Em seguida, foi pesado cerca de 10 g do material previamente seco com o objetivo de formar um pequeno corpo globular, que será rolada sobre uma placa de vidro com a aplicação de pressão com a palma da mão até que seja formado um pequeno cilindro com o material (Figura 10), este procedimento tem a finalidade de verificar se a amostra será capaz de atingir um diâmetro de 3 mm sem se fragmentar, quando o objetivo for atingido, ou seja, quando formar-se um cilindro com 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento (verificação feita com gabarito), parte desse material é transferido de forma imediata para um recipiente adequado, para que seja feita a determinação de forma adequada como é estabelecido pela norma NBR 7180 (ABNT, 2016), porém, caso o cilindro venha a fragmentar antes de atingir os 3 mm de diâmetro pré-estabelecido, é necessário repetir o processo inicial, adicionando mais água e repetindo todo o procedimento. Logo, o procedimento deve ser feito pelo menos três vezes, para fim de se descobrir pelo menos três valores de umidade, onde os resultados obtidos serão considerados positivos quando os valores das umidade não diferem mais do que 5% da média.

Figura 10 - Cilindro moldado



Fonte: Autor (2025)

4.2.4 Compactação

O ensaio de compactação do solo, é regido pela norma NBR 7182 (ABNT, 2016), nela, está contido o procedimento laboratorial para caracterização geotécnica, o ensaio é também complementado pela norma NBR 6457 (ABNT, 2016), onde está predefinido o procedimento de preparação do solo para os ensaios de compactação. Através da compactação

é possível determinar a curva de compactação, que relaciona a massa específica aparente seca com o teor de umidade, assim, adotando o método de proctor normal para determinar a umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

Neste procedimento, a amostra de solo é compactada em molde cilíndrico, em seguida, é aplicado de 26 golpes em cada uma das 5 camadas do material estudado, após finalizado a aplicação da energia intermediária através do soquete, uma amostra do material é colocada para secagem em estufa com a finalidade de obter a umidade de cada ponto do material de estudo.

4.2.5 CBR (*California Bearing Ratio*) e Expansibilidade

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR) permite determinar parâmetros fundamentais para projetos de pavimentação, tais como: Dimensionamento Estrutural e Segurança, Controle de Qualidade e Durabilidade e Economia e Otimização de Custos, garantindo a durabilidade, segurança e eficiência do pavimento. O procedimento é normatizado pela ABNT NBR 9895:2025 – Solo — Índice de suporte Califórnia (ISC) — Método de ensaio, que define que o ensaio deve ser realizado com amostras deformadas de material que passa na peneira de 19 mm, utilizando corpos de prova compactados segundo o ensaio de compactação e umidade ótima obtida no ensaio de Proctor.

Após o fim da moldagem dos corpos de prova, os mesmos serão submersos por 96 horas com a aplicação de uma sobrecarga, para que sua expansibilidade seja avaliada, em seguida, com o auxílio de uma prensa, ocorrerá o ensaio de penetração a uma velocidade de 1,27 mm/min, onde, as cargas são registradas para manter uma padronização da penetração. Assim, o valor do CBR é determinado através da razão entre tensões observadas e tensões de referência.

4.2.6 FRX

O ensaio baseia-se na utilização de radiação eletromagnética de alta energia, não destrutiva à amostra, permitindo a análise química de sua composição. O procedimento consiste na excitação dos elétrons dos átomos presentes no material por meio da incidência de energia, provocando a emissão de radiação característica quando esses elétrons retornam ao seu estado fundamental. Cada elemento químico emite radiação com comprimento de onda específico e intensidade proporcional à sua concentração, possibilitando a identificação e quantificação dos constituintes da amostra. Dessa forma, o ensaio de Fluorescência de Raios

X destaca-se como uma importante ferramenta para o controle de qualidade e avaliação da viabilidade do material (JENKINS, 1999; BECKHOFF et al., 2006).

4.2.7 FTIR

Durante o ensaio, o instrumento emite radiação infravermelha através da amostra, e as moléculas presentes no material absorvem essa radiação em frequências específicas, correspondentes às energias de vibração de suas ligações químicas, possibilitando a identificação da estrutura molecular da amostra. O resultado é registrado com o auxílio de um espectrômetro, no qual a absorção é representada por picos característicos, associados a grupos funcionais específicos de cada material (STUART, 2004).

Com o olhar mais voltado para o estudo dos solos, o FTIR é utilizado para identificar a presença de compostos orgânicos, grupos hidroxilas e para monitorar as mudanças nas ligações químicas após a o solo se misturar com outros tipos de material, como por exemplo resíduos ou ligantes.

4.2.8 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência (MR) é um parâmetro mecânico fundamental que representa a capacidade de um solo ou material empregado em pavimentos de sofrer deformações elásticas e recuperar-se após a aplicação de carregamentos repetidos, sendo amplamente adotado nos métodos mecanicistas-empíricos de dimensionamento de pavimentos. Esse parâmetro expressa o comportamento resiliente dos materiais quando submetidos a solicitações semelhantes às impostas pelo tráfego veicular.

A determinação do módulo de resiliência foi realizada de acordo com a norma DNIT PRO 134/2018 – ME, por meio da aplicação de carregamentos cíclicos em corpos de prova cilíndricos de solo compactado na umidade ótima e sob energia de compactação intermediária. O ensaio foi executado em câmara triaxial, no Centro de Tecnologia em Asfalto Norte/Nordeste, localizado no campus do Pici, em Fortaleza–CE, mantendo-se pressão confinante constante durante cada etapa de carregamento e aplicando-se carregamento axial repetitivo do tipo haversino. Durante o ensaio, foram registradas as deformações elásticas recuperáveis ao longo dos ciclos de carregamento, possibilitando a determinação do MR em função dos estados de tensão impostos.

Esse procedimento experimental é amplamente reconhecido na literatura nacional, uma vez que permite representar de forma mais realista o comportamento mecânico dos solos

sob condições de tráfego, conforme destacado por Medina e Motta (2015) e Bernucci *et al.* (2010). Segundo esses autores, o módulo de resiliência constitui um dos principais parâmetros para avaliação estrutural de camadas de pavimentos, sendo essencial para análises de desempenho e vida útil das estruturas rodoviárias no contexto brasileiro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são 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 para os ensaios de granulometria, limite de Atterberg, CBR, FTIR, Módulo de resiliência, FRX .

5.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

A fim de elucidar a constituição mineralógica e o grau de pureza do material submetido à análise, a Fluorescência de Raios X (FRX) foi empregada. A Tabela 2 ilustra a distribuição dos constituintes químicos, evidenciando a predominância de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3), os quais, em conjunto, correspondem à fração majoritária da amostra.

Tabela 2 - Composição química em FRX

Componente	Concentração	Unidade
SiO_2	48,97	%
Al_2O_3	10,05	%
Fe_2O_3	7,78	%
K_2O	2,07	%
TiO_2	1,14	%
P_2O_5	0,47	%
SO_3	0,34	%
CaO	0,2	%
V_2O_5	263,1	ppm
Cr_2O_3	85,4	ppm
MnO	617,5	ppm
NiO	82	ppm
CuO	203,2	ppm
ZnO	61,6	ppm

Fonte: Autor (2025)

Os resultados da análise por Fluorescência de Raios X (FRX) indicam que o material apresenta composição predominantemente silicosa, com teor de SiO_2 de 48,97%. Embora esse valor indique presença significativa de minerais do grupo do quartzo, observa-se que ele é

inferior ao esperado para um arenito quartzoso puro, cujos teores de dióxido de silício normalmente ultrapassam 90%. Essa redução pode ser atribuída à presença de matriz argilosa, notadamente composta por caulinita, conforme identificado na análise por FTIR, a qual contribui para a diluição do teor de sílica livre na composição global do material (DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 1992; PETTIJOHN; POTTER; SIEVER, 1987).

Do ponto de vista geotécnico, a presença dominante de quartzo confere ao material maior rigidez e resistência ao cisalhamento, em razão do comportamento essencialmente friccional dos grãos. Por outro lado, a fração argilosa exerce influência significativa sobre o comportamento mecânico do solo, sobretudo no que se refere à interação entre partículas, à coesão aparente e à sensibilidade à variação de umidade. Dessa forma, mesmo em materiais com composição majoritariamente silicosa, pequenas quantidades de argila podem governar o desempenho estrutural do solo. Essa característica pode ser estabelecida pela associação entre a distribuição granulométrica no entanto seria necessários os resultados de ensaios de resistência ao cisalhamento para comprovação, os quais permitem avaliar a contribuição relativa das frações grossa e fina no comportamento mecânico do material, bem como a influência da umidade e do estado de compactação sobre seus parâmetros resistentes (MITCHELL; SOGA, 2005; GRIM, 1968).

O teor de óxido de alumínio (Al_2O_3), igual a 10,05%, associado ao conteúdo de óxido de ferro (Fe_2O_3) de 7,78%, indica a presença de minerais argilosos e óxidos de ferro, comuns em solos tropicais e materiais de origem laterítica. Esses componentes contribuem para a coesão do material e podem influenciar tanto a capacidade de retenção de água quanto o comportamento mecânico sob carregamentos repetidos.

O teor de óxidos de ferro identificado (7,78%) pode, em tese, contribuir para processos de oxidação e cimentação secundária a longo prazo, sobretudo em ambientes tropicais. Entretanto, conforme discutido por Das e Sobhan (2018), a estabilização natural associada à presença de óxidos de ferro é característica de solos lateríticos, os quais apresentam teores elevados de Fe_2O_3 e Al_2O_3 , além de condições pedogenéticas específicas que favorecem a formação de ligações cimentantes efetivas.

Em materiais com teores reduzidos a moderados de óxidos de ferro, como o resíduo de Pedra Castelo avaliado, esses compostos tendem a atuar predominantemente como revestimento superficial dos grãos, sem promover ganho expressivo de resistência mecânica. Assim, o comportamento do material permanece essencialmente inerte do ponto de vista estrutural, sendo controlado majoritariamente pela distribuição granulométrica, pelo empacotamento das partículas e pelo atrito interno, não sendo possível atribuir ao teor de

óxido de ferro observado um efeito significativo de estabilização ou lateritização.

Os resultados da análise por Fluorescência de Raios X (FRX) indicam que, embora o material apresente composição predominantemente silicosa, com teor de SiO_2 de 48,97%, esse valor é inferior ao esperado para um material quartzoso puro. Tal comportamento está associado à presença de matriz argilosa, notadamente composta por caulinita, conforme identificado na análise por FTIR, a qual contribui para a redução do teor relativo de sílica livre e exerce influência significativa no comportamento mecânico da mistura.

Do ponto de vista químico, a reatividade pozolânica entre a sílica e a alumina presentes no material e o solo é considerada improvável, uma vez que esse tipo de reação depende da presença de um agente ativador, como cal ou cimento. A ausência desses ativadores, aliada ao baixo teor de óxido de cálcio ($\text{CaO} = 0,20\%$), indica que não são esperados mecanismos de estabilização química capazes de promover ganhos estruturais relevantes. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam que o comportamento do material incorporado é essencialmente granular e inerte, sendo governado predominantemente por interações físicas entre as partículas.

Os óxidos alcalinos e alcalino-terrosos, representados principalmente pelo óxido de potássio ($\text{K}_2\text{O} = 2,07\%$), aparecem em concentrações reduzidas e não exercem influência significativa na cimentação da matriz. Assim, eventuais incrementos de rigidez observados no comportamento mecânico da mistura estão associados principalmente a processos físicos, como rearranjo, compactação e intertravamento das partículas, e não a reações químicas de estabilização.

Adicionalmente, a presença de dióxido de titânio ($\text{TiO}_2 = 1,14\%$) e de pentóxido de fósforo ($\text{P}_2\text{O}_5 = 0,47\%$) é compatível com materiais de origem ígnea ou metamórfica, sendo comumente associados a minerais acessórios estáveis, com influência limitada nas propriedades mecânicas. O baixo teor de trióxido de enxofre ($\text{SO}_3 = 0,34\%$), por sua vez, indica reduzida propensão à formação de compostos expansivos, o que está em consonância com os baixos valores de expansão observados nos ensaios de CBR, reforçando a coerência entre os resultados físico-químicos e geotécnicos obtidos.

Os elementos-traço, identificados em concentrações na ordem de ppm, como MnO , V_2O_5 , Cr_2O_3 , NiO , CuO e ZnO , refletem a composição mineralógica natural do resíduo e não indicam presença significativa de contaminantes. O teor de MnO (617,5 ppm) e V_2O_5 (263,1 ppm) pode estar associado à matriz mineral da Pedra Castelo, sem implicações negativas diretas para o desempenho geotécnico do material.

De forma geral, os resultados de FRX indicam que o resíduo de Pedra Castelo

apresenta caráter predominantemente mineral e quimicamente inerte, com elevado teor de SiO_2 , o que, em princípio, sugeriria um comportamento semelhante ao de um agregado silicoso, onde, teoricamente seria capaz de contribuir para o aumento do atrito interno da mistura. No entanto, a confirmação dessa hipótese exigiria a realização de ensaios de cisalhamento direto, os quais não foram o escopo desta avaliação, justificando o fato desse potencial não ter sido plenamente verificado na dosagem analisada.

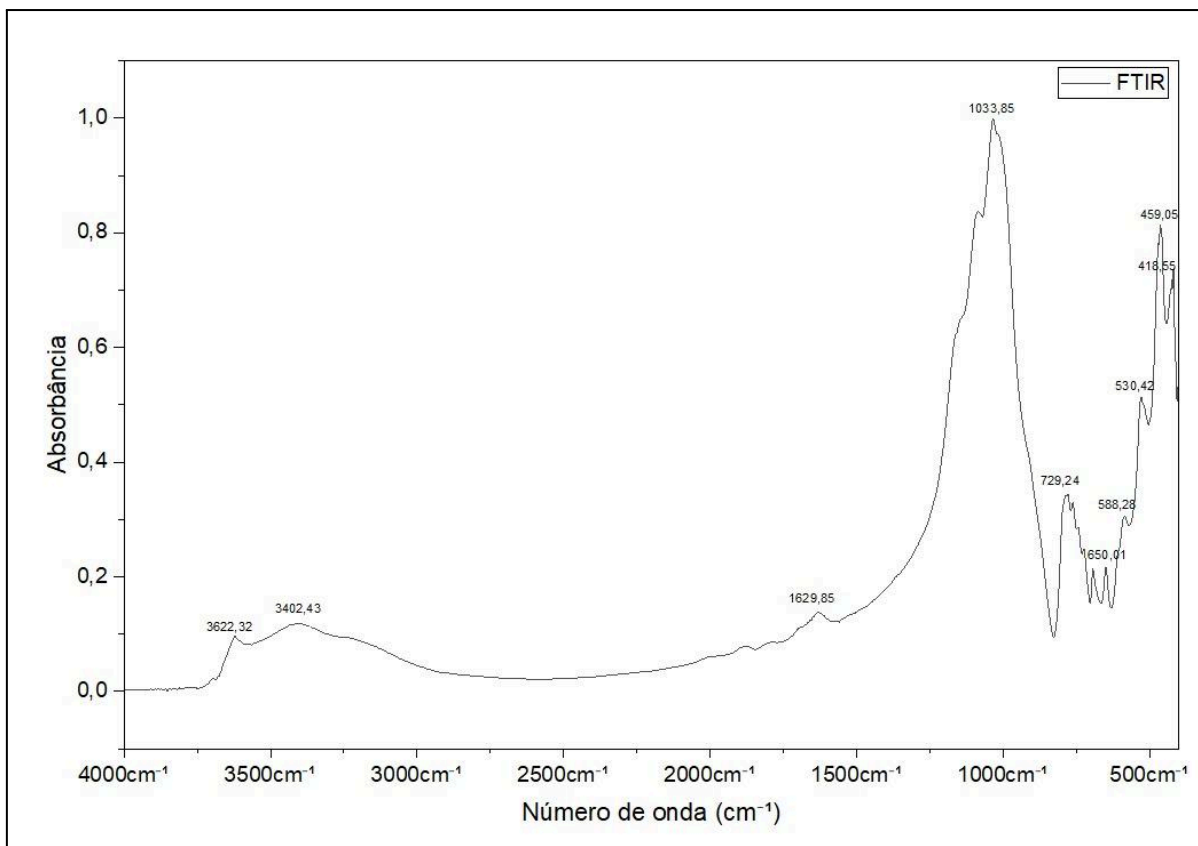
Essa discrepância pode ser explicada pela combinação entre a morfologia dos grãos silicosos e a presença de minerais aluminossilicatos na fração fina do material. Embora a análise granulométrica indique predominância de partículas mais grossas, a presença de aproximadamente 10,05% de Al_2O_3 , aliada à identificação de grupos funcionais característicos de minerais argilosos por meio do ensaio de FTIR, indica a existência de uma fração fina de natureza argilosa capaz de interferir no empacotamento granular, atuando como elemento separador entre os grãos de maior dimensão.

Dessa forma, embora o resíduo seja quimicamente inerte e silicoso, seu comportamento na mistura não foi governado apenas pela natureza mineral, mas principalmente pela interação entre morfologia, distribuição granulométrica e geração de finos, o que explica por que os efeitos observados nos ensaios de CBR e Módulo de Resiliência estiveram associados ao empacotamento e ao nível de confinamento, e não a processos de estabilização química.

5.2 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A caracterização dos grupos funcionais presentes no resíduo foi conduzida por meio da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), conforme apresentado na Figura 11. O espectro obtido evidencia bandas de absorção características que possibilitam a identificação da natureza das ligações químicas predominantes na amostra, estabelecendo uma correlação com os componentes previamente determinados na análise de Fluorescência de Raios X (FRX).

Figura 11 - Espectro de FTIR



Fonte: Autor (2025)

O espectro de FTIR obtido para o resíduo de Pedra Castelo evidencia bandas características de materiais predominantemente minerais, com destaque para silicatos e minerais argilosos, confirmando o caráter essencialmente inorgânico do material. Na região entre aproximadamente 3700 e 3500 cm^{-1} , observam-se bandas associadas às vibrações de estiramento O–H, típicas de minerais como caulinita e haloisita, bem como de hidroxilas estruturais presentes em óxidos e hidróxidos metálicos (BENITES et al., 1999; STEVENSON, 1994).

A presença de uma banda discreta em torno de 1630 cm^{-1} está relacionada à deformação angular de O–H da água adsorvida fisicamente na superfície das partículas minerais, sendo comum em solos e resíduos minerais finos (DICK et al., 2008).

A presença da banda em 1630 cm^{-1} confirma a existência de água adsorvida, condizente com a natureza higroscópica do solo, embora o comportamento volumétrico estável observado no CBR sugira que essa adsorção não comprometa a estabilidade dimensional do material.

O pico mais intenso do espectro de FTIR ocorre na faixa entre 1100 e 1000 cm^{-1} , com máximo próximo a 1033,85 cm^{-1} , sendo característico das vibrações de estiramento Si–O–Si e

Si–O–Al, típicas de minerais silicáticos, como quartzo e feldspatos (COUCEIRO; SANTANA, 1999; MARTINS, 2009). Esse resultado corrobora os dados obtidos por meio da análise de Fluorescência de Raios X (FRX), que indicaram elevado teor de SiO₂, reforçando o caráter predominantemente silicoso do resíduo. Adicionalmente, a largura dessas bandas pode estar associada ao grau de cristalinidade do quartzo presente no material, uma vez que picos mais estreitos e bem definidos indicam estruturas cristalinas mais ordenadas, enquanto o alargamento das bandas sugere maior desordem estrutural ou a presença de fases menos cristalinas. Essa característica mineralógica exerce influência direta nas propriedades mecânicas do resíduo, visto que quartzos com maior grau de cristalinidade tendem a apresentar maior dureza e resistência à abrasão, podendo impactar seu comportamento quando empregado em misturas granulares ou em aplicações geotécnicas.

Na região entre 800 e 500 cm⁻¹, são observadas bandas associadas a deformações estruturais de silicatos e à presença de quartzo, além de possíveis contribuições de óxidos de ferro e alumínio (BENITES et al., 1999). A ausência de bandas características de carbonatos, geralmente observadas próximas a 1400 e 870 cm⁻¹, indica que o material não possui caráter calcário significativo, o que explica a inexistência de reações químicas de estabilização associadas ao cálcio.

A análise por FTIR confirma que o resíduo de Pedra Castelo é constituído majoritariamente por fases minerais estáveis, com predominância de quartzo e caulinita, indicando baixa reatividade química do material. A presença dominante de quartzo confere rigidez intrínseca às partículas, enquanto a caulinita, por sua vez, atua como matriz argilosa pouco reativa, não promovendo a formação de ligações químicas ou cimentantes entre os grãos. Essa combinação mineralógica implica que o comportamento mecânico da mistura passa a depender exclusivamente de mecanismos físicos, como empacotamento, atrito interno e intertravamento granular, sem contribuição significativa de processos de estabilização química.

Nesse contexto, a incorporação do resíduo, especialmente na dosagem de 30%, resultou em empacotamento granular ineficiente, uma vez que o aumento do teor de finos associados à fração caulínica comprometeu o contato efetivo *grão-a-grão* entre as partículas arenosas. A ausência de ligações químicas capazes de compensar essa deficiência estrutural tornou o material altamente sensível à distribuição granulométrica, refletindo-se na redução expressiva do Índice de Suporte Califórnia (CBR = 9%). Assim, o fracasso mecânico observado no ensaio de CBR não está associado à instabilidade química ou à presença de fases expansivas, mas sim à dependência exclusiva do intertravamento físico, o qual se

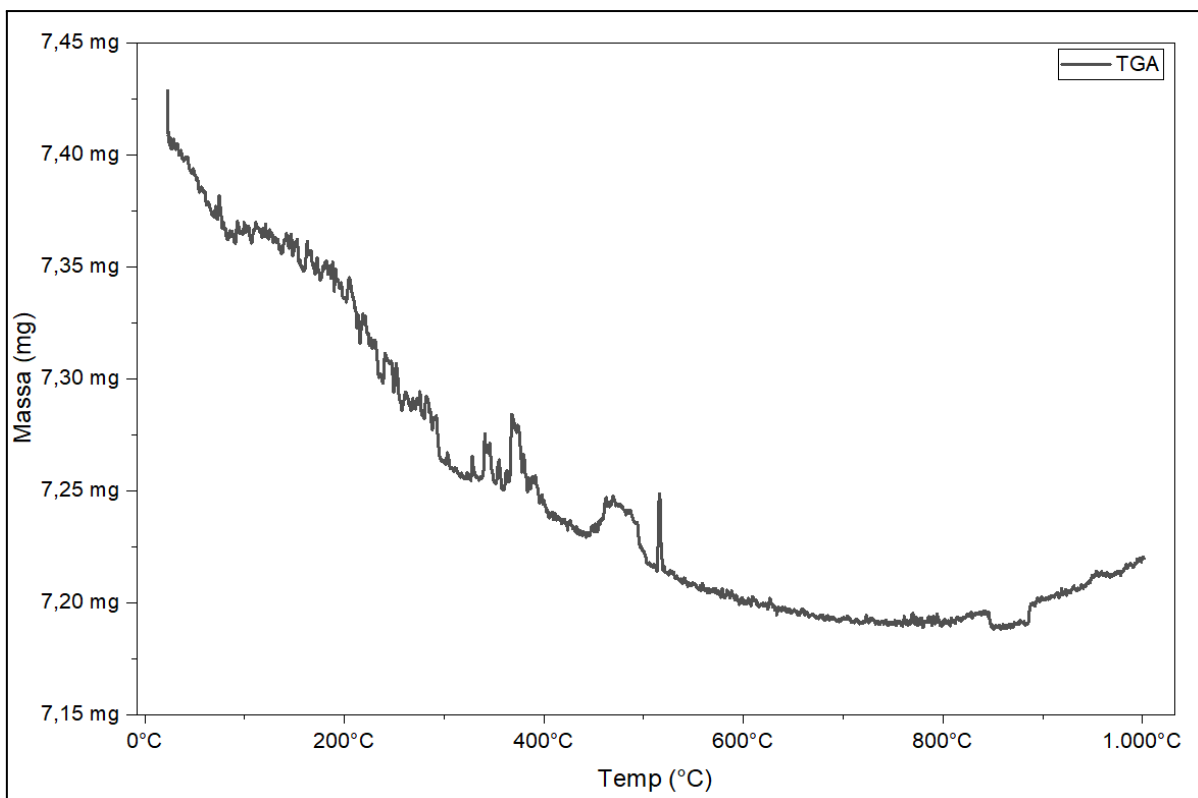
mostrou insuficiente para garantir capacidade de suporte adequada.

Dessa forma, os efeitos observados nos ensaios geotécnicos, como a redução do CBR e a variação do desempenho mecânico da mistura, estão diretamente relacionados à estrutura mineralógica do resíduo e à sua baixa reatividade química, conforme discutido por Stevenson (1994) e Martins (2009), reforçando que o comportamento do material é governado predominantemente por mecanismos físicos, e não por processos de estabilização química.

5.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

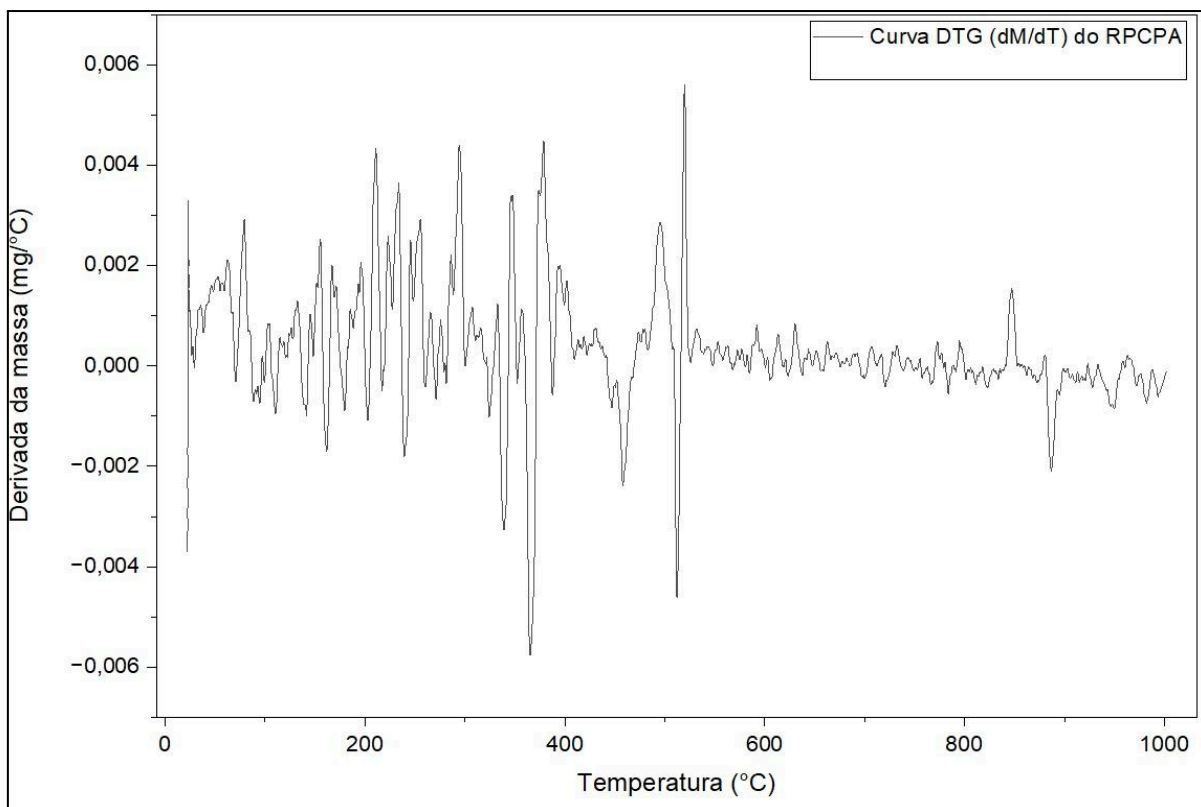
A análise termogravimétrica (TGA) do material avaliado evidencia um comportamento térmico típico de materiais argilosos com predominância de fases caulíníticas, conforme descrito na literatura especializada. A figura 12 e 13 apresentada abaixo mostra esse comportamento:

Figura 12 - Análise Termogravimétrica (TGA)



Fonte: Autor (2025)

Figura 13 - Termogravimetria Derivada (DTG)



Fonte: Autor (2025)

Análise termogravimétrica (TGA), associada à sua derivada (DTG), evidencia que o material apresenta perda de massa contínua ao longo do aquecimento até aproximadamente 1000 °C, indicando a ocorrência de distintos eventos térmicos relacionados à eliminação de água, decomposição de fases hidratadas e transformações estruturais dos argilominerais presentes.

Na faixa inicial de temperatura, até cerca de 200 °C, observa-se uma perda de massa gradual, atribuída à eliminação de água livre e de água fisicamente adsorvida na superfície das partículas minerais. Esse comportamento é típico de argilas naturais e resíduos minerais finos, sendo amplamente relatado em estudos de caracterização térmica de materiais argilosos (Ferreira *et al.*, 2024). A curva DTG nessa região apresenta picos de baixa intensidade e distribuição difusa, o que confirma a natureza progressiva e pouco energética desse processo de dessorção física.

Entre aproximadamente 250 °C e 350 °C, identifica-se um novo evento térmico associado à perda de massa, relacionado principalmente à desidratação de hidróxidos de alumínio, em especial a gibbsita, além da possível decomposição de pequenas frações de matéria orgânica residual. Segundo Ferreira *et al.* (2024), esse intervalo de temperatura é

característico da instabilidade térmica dessas fases hidratadas, sendo comum em argilas utilizadas na indústria cerâmica e em materiais de origem laterítica. No gráfico de TGA, a perda de massa nessa região é bastante sutil, enquanto a curva DTG apresenta oscilações de baixa magnitude, sugerindo que a presença de matéria orgânica é residual ou desprezível, corroborando a interpretação de baixa reatividade química do material.

O evento térmico mais significativo ocorre na faixa de 500 °C a 600 °C, correspondente à desidroxilação da caulinita. Nesse processo, há a liberação das hidroxilas estruturais sob a forma de água de constituição, promovendo a transformação irreversível da caulinita em metacaulinita. Esse fenômeno é claramente identificado na curva DTG por um pico mais definido, indicando maior taxa de perda de massa e maior intensidade energética do evento. A presença da caulinita no material está diretamente relacionada à presença de argilominerais, uma vez que suas hidroxilas estruturais favorecem a adsorção de água e conferem capacidade de moldagem. Assim, a remoção dessas hidroxilas explica a eliminação da plasticidade após esse intervalo térmico, evidenciando que a coesão física do resíduo é frágil e dependente da integridade estrutural da caulinita, sem contribuição de ligações químicas permanentes. Essa etapa marca uma alteração definitiva das propriedades físico-químicas do material, especialmente aquelas associadas à plasticidade, à estrutura cristalina e à reatividade superficial (Ferreira *et al.*, 2024; Lechheb *et al.*, 2021).

Embora a discussão permaneça no campo da caracterização térmica, a transformação da caulinita em metacaulinita apresenta relevância indireta para processos industriais e aplicações em engenharia, particularmente no que se refere à estabilização térmica de materiais minerais. A metacaulinita é uma fase amorfa, termicamente mais estável e com maior potencial reativo em sistemas cimentícios ou pozolânicos, o que é explorado, por exemplo, na produção de ligantes suplementares e materiais estabilizados. No contexto de pavimentos, ainda que as temperaturas ambientais não alcancem valores suficientes para promover essa transformação, o conhecimento do comportamento térmico do material é relevante para avaliar sua estabilidade estrutural sob condições extremas, como incêndios, exposição prolongada à radiação solar intensa ou processos industriais de beneficiamento térmico. Além disso, a ausência de transformações significativas em temperaturas inferiores a 500 °C sugere que o material não sofre degradações estruturais relevantes sob condições ambientais usuais, o que contribui indiretamente para a durabilidade do pavimento.

Após aproximadamente 700 °C, a curva termogravimétrica apresenta tendência à estabilização da massa, indicando que a maior parte das transformações térmicas já ocorreu. A curva DTG nessa região torna-se praticamente horizontal, evidenciando taxas de perda de

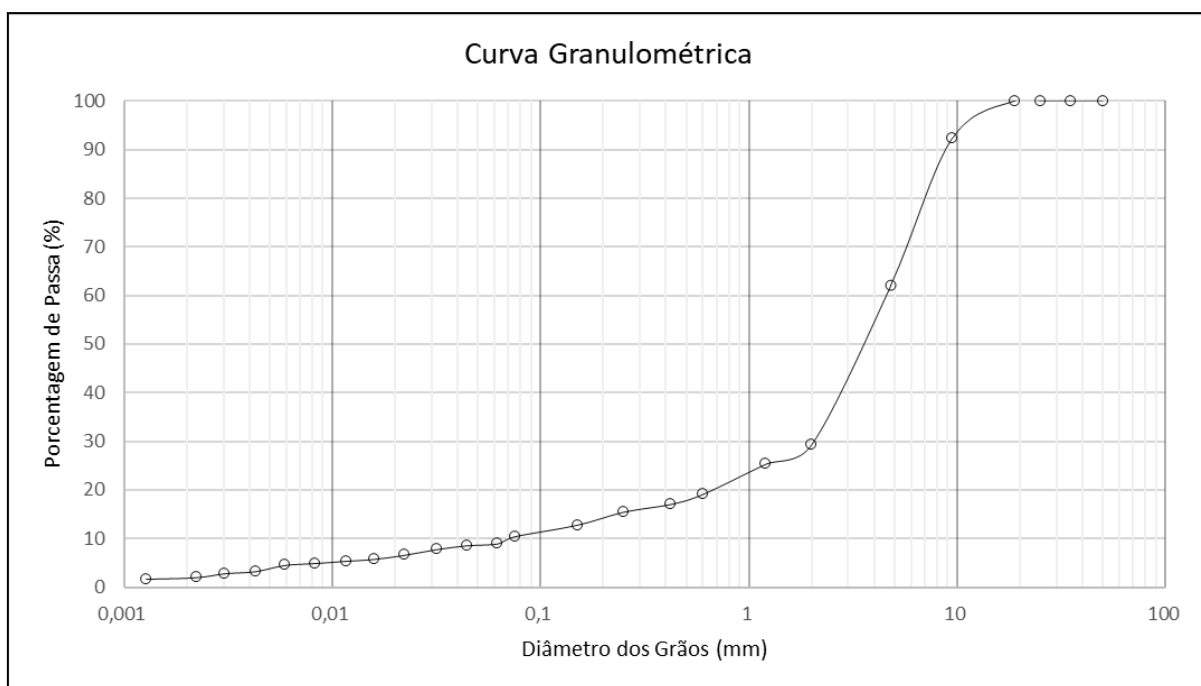
massa próximas de zero. Pequenas variações residuais podem estar associadas a rearranjos estruturais ou à formação de fases mais estáveis, comportamento também descrito na literatura para argilas caulínicas submetidas a altas temperaturas (Ferreira *et al.*, 2024).

5.4 Análise da Granulometria

5.4.1 Análise granulométrica do resíduo de Pedra Castelo Amarela (RCPA)

Os gráficos e os resultados do ensaio de análise granulométrica foram apresentados e analisados conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 7181 (ABNT, 2016), permitindo a caracterização da distribuição do tamanho das partículas do solo natural e do resíduo de RCPA (Figura 14).

Figura 14 - Curva Granulométrica por sedimentação do resíduo de Pedra Castelo Amarela (RCPA).



Fonte: Autor (2025)

A análise granulométrica da amostra, interpretada segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), evidencia que o material apresenta comportamento típico de solo de granulação grossa, uma vez que menos de 10 % da amostra é constituída por partículas passantes na peneira nº 200 (0,075 mm), valor inferior a 50%. Dessa forma, conclui-se que a fração predominante é composta por partículas maiores que 0,075 mm. A avaliação da fração grossa indica predominância de areia, visto que a parcela correspondente

ao pedregulho (partículas com diâmetro superior a 4,75 mm) representa cerca de 37,9% da amostra total, enquanto a fração arenosa (entre 4,75 mm e 0,075 mm) corresponde a aproximadamente 51,7%, caracterizando o solo como arenoso segundo os critérios do SUCS.

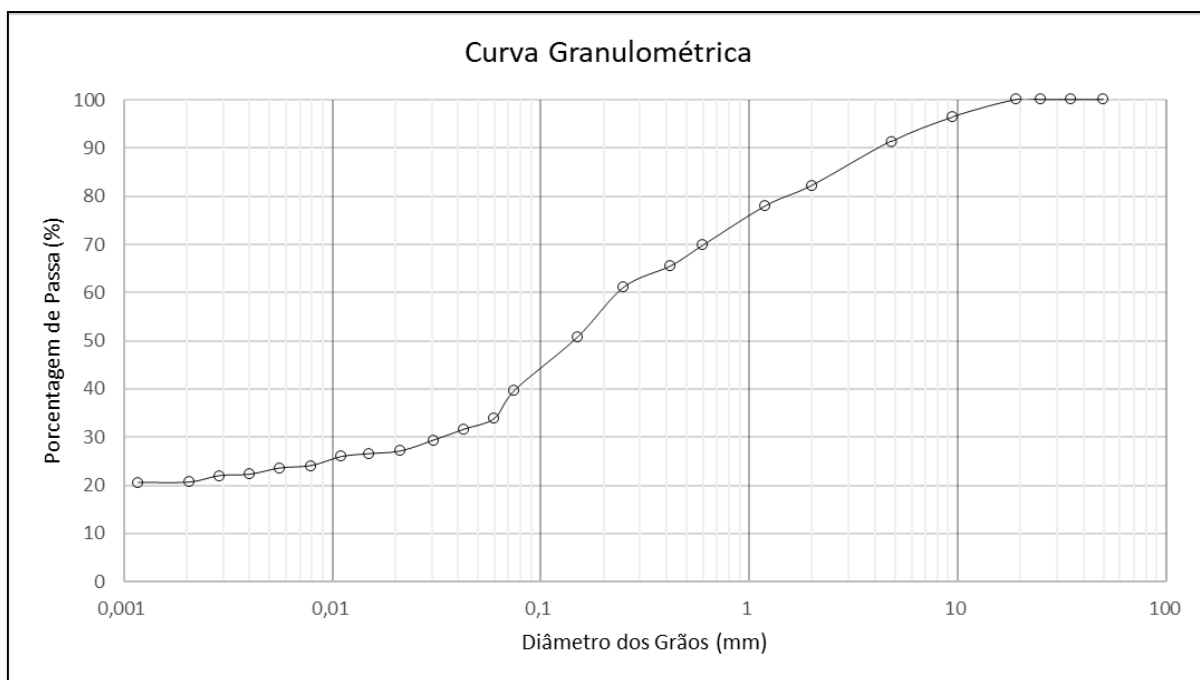
A distribuição granulométrica da fração arenosa revela uma composição relativamente equilibrada entre areia grossa, média e fina. Observa-se que a areia grossa (4,75 mm a 2,00 mm) representa cerca de 32,8% da amostra, a areia média (2,00 mm a 0,42 mm) aproximadamente 12,2% e a areia fina (0,42 mm a 0,074 mm) cerca de 6,7%. Essa distribuição indica um material uniforme com predominância arenosa (51,7%). O teor de finos, correspondente à fração silte e argila (diâmetros inferiores a 0,074 mm) é de 10%. Essa característica implica que o comportamento mecânico e hidráulico do material é significativamente influenciado pela fração arenosa, o que pode elevar a permeabilidade e alterar a resistência mecânica do solo.

De acordo com o SUCS, quando o teor de finos é entre 5% e 10%, a classificação do solo é dupla, sendo caracterizado como areia bem graduada e areia siltosa (SW-SM) de acordo com o CNU (64) e o CC (12,25) da curva granulométrica do solo. No presente estudo, sua classificação definitiva é determinada por meio da natureza desses fins. Seguindo os requisitos do Sistema de Classificação Unificado de Solos (ASTM, 2025), o procedimento de limite de plasticidade determinou que o resíduo se comporta como um material não plástico (NP).

5.4.2 Análise granulométrica do resíduo do solo de Crateús

Os gráficos e os resultados do ensaio de análise granulométrica foram apresentados e analisados conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 7181 (ABNT, 2016), o resultado do ensaio de granulometria para o solo de Crateús está apresentado na Figura 15, em que apresenta um solo bem graduado, evidenciando a predominância da fração areia, com participação secundária de pedregulho e teor de finos.

Figura 15 - Curva Granulométrica do solo de Crateús



Fonte: Autor (2025)

A análise da curva granulométrica indica que o material apresenta distribuição contínua, com predominância da fração areia e presença significativa de finos, concentrados principalmente na faixa de silte (0,075 mm a 0,005 mm). O teor de material passante na peneira nº 200 é superior a 20%, o que, de acordo com os critérios do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), caracteriza o solo como uma areia siltosa (SM).

Esse comportamento granulométrico sugere que o material possui caráter predominantemente granular, típico de solos arenosos, os quais apresentam, em geral, elevada permeabilidade. Contudo, a presença de uma fração significativa de finos, concentrada principalmente na faixa de silte, tende a preencher os vazios entre os grãos maiores, promovendo a redução da permeabilidade e o aumento da sensibilidade à variação de umidade. Essa condição pode influenciar negativamente os parâmetros de resistência mecânica, como o Índice de Suporte Califórnia (CBR), conforme observado nos ensaios realizados.

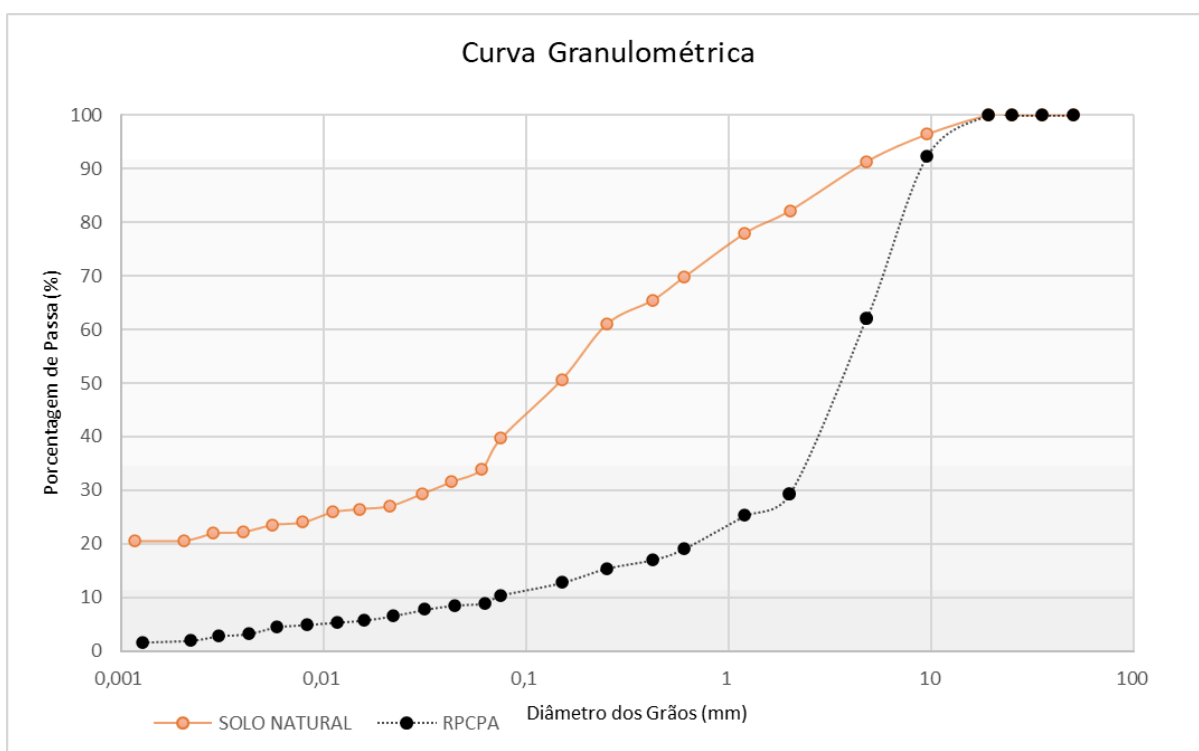
Embora a presença de finos favoreça a redução da expansibilidade, seu excesso compromete o intertravamento entre partículas e a mobilização da resistência por atrito, o que explica o desempenho insatisfatório do material para aplicação em camadas estruturais de pavimentação, especialmente quando comparado aos requisitos normativos para sub-base. Assim, a classificação SUCS como SM é coerente com o comportamento mecânico

observado, reforçando a necessidade de ajustes granulométricos ou estabilização para viabilizar sua aplicação em pavimentação rodoviária.

5.4.3 Análise granulométrica do resíduo do solo de Crateús + Resíduo

Os gráficos e os resultados do ensaio de análise granulométrica foram apresentados e analisados conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 7181 (ABNT, 2016), o resultado do ensaio de granulometria para o solo de Crateús + Resíduo está apresentado na Figura 16, De acordo com os resultados do ensaio de análise granulométrica, observa-se que o material apresenta 39% a 40% de finos, correspondentes à fração passante na peneira nº 200 (0,075 mm). Conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), trata-se de um solo de granulação grossa, com predominância da fração areia, que representa aproximadamente 60,7% da amostra, enquanto a fração pedregulho corresponde a cerca de 9,1%. Dessa forma, para caracterizar a fração fina, foram realizados os ensaios de consistência, e como resultado do mesmo se obteve um Limite de Liquidez (LL) de 25% e um Índice de Plasticidade (IP) de 7%. Assim, resultando em uma dupla classificação SM-SC (areia argilo-siltosa).

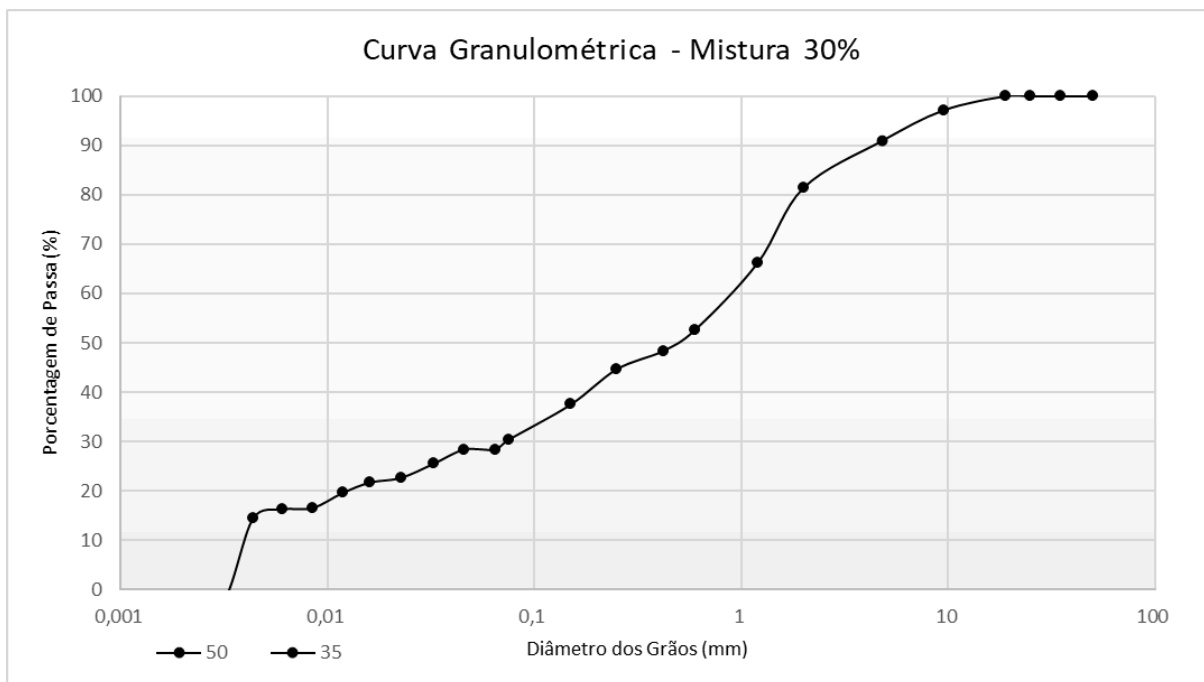
Figura 16 - Curva Granulométrica do solo de Crateús + Resíduo



Fonte: Autoria própria (2025)

Na figura 17, podemos observar a análise granulométrica da mistura composta por 30% de resíduo (RPCPA) proveniente da pedra do município de Castelo do Piauí, de coloração amarelada e o solo de Crateús, e em seguida na Figura 18 foi realizada a comparação da curva granulométrica obtida com as faixas granulométricas estabelecidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT):

Figura 17 - Curva Granulométrica do solo de Crateús + 30 % de RPCPA



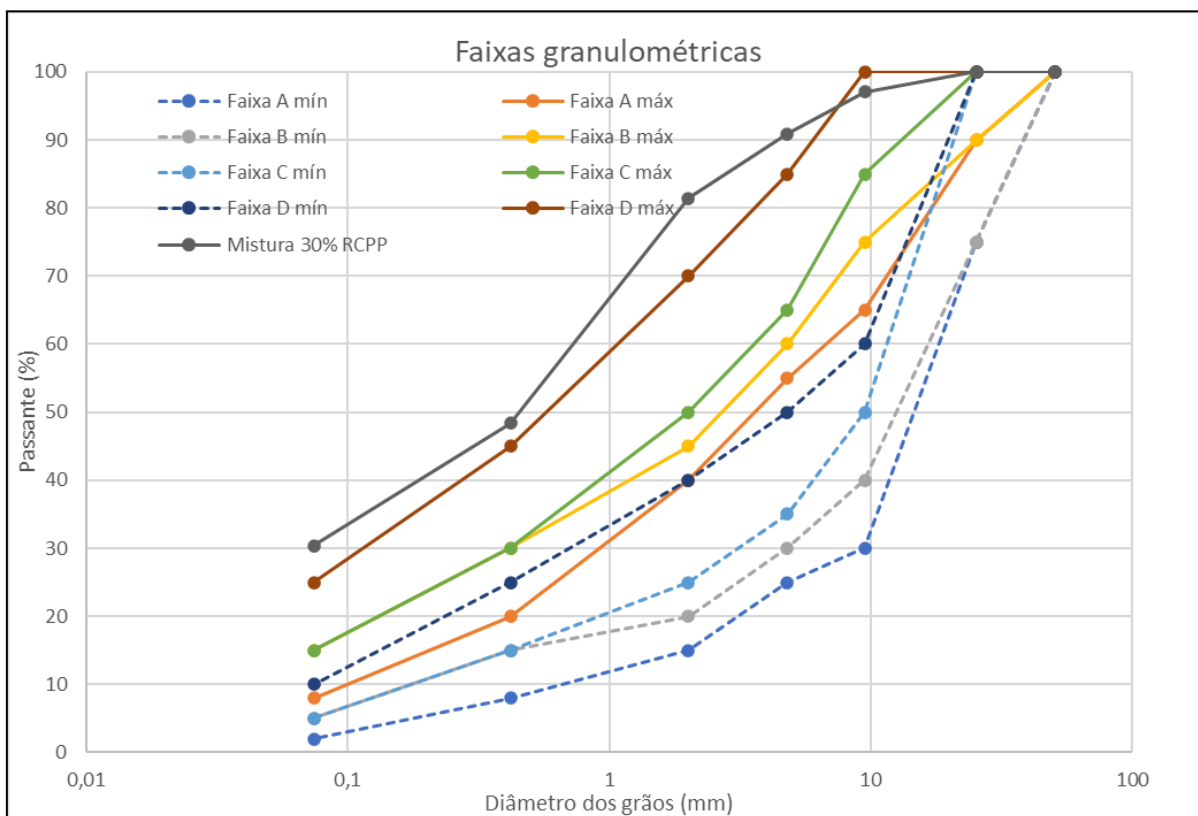
Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 18, verificou-se que a curva granulométrica da mistura se manteve acima, assim apresentando um desvio sistemático acima dos limites superiores das faixas A, B, C e D do DNIT. Este posicionamento da curva indica que a mistura possui uma granulometria excessivamente fina para atender aos requisitos normativos dessas faixas. Observa-se, ainda, que a mistura apresentou uma porcentagem de finos superior àquela esperada pela simples soma dos teores de finos dos materiais isolados.

Esse comportamento está associado ao processo de mistura e manuseio dos materiais, que pode promover a fragmentação adicional das partículas do resíduo durante as etapas de homogeneização, compactação e peneiramento, gerando partículas de menor diâmetro. Além disso, ocorre o fenômeno de redistribuição granulométrica, no qual os finos presentes no resíduo passam a ocupar os vazios entre as partículas maiores do solo natural, e diminuindo o índice de vazios do solo. Ressalta-se também que diferenças na forma, textura superficial e resistência mecânica dos grãos contribuem para a maior produção e retenção de finos na

mistura, justificando a não linearidade entre os teores granulométricos dos materiais individuais e da mistura resultante.

Figura 18 - Análise granulométrica do Solo de Crateús + Resíduo em comparação com as faixas do DNIT

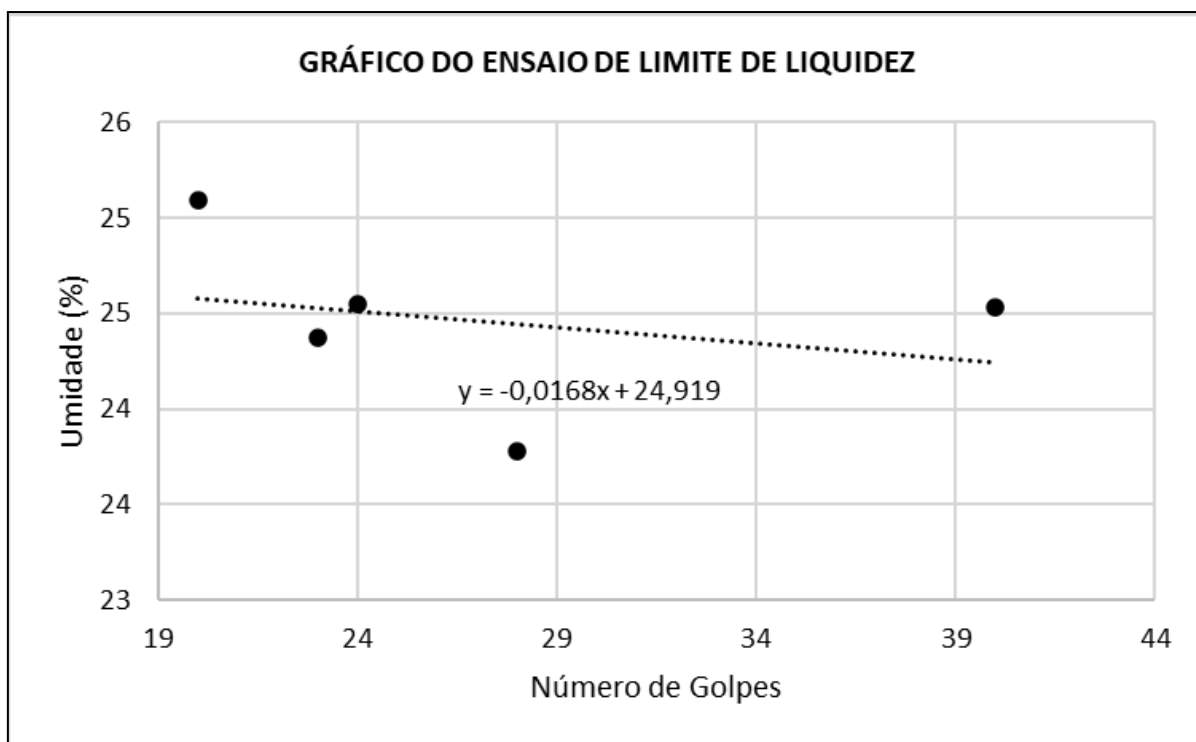


Fonte: Autoria Própria (2025)

5.5 Limites de Atterberg

De acordo com a Figura 19, o ensaio de limite de liquidez do solo de Crateús foi realizado conforme os procedimentos normativos, utilizando o aparelho de Casagrande para estabelecer a relação entre o teor de umidade e o número de golpes necessários para o fechamento da ranhura. A partir dos resultados experimentais e da curva ajustada em escala logarítmica, determinou-se o limite de liquidez correspondente ao teor de umidade associado a 25 golpes, resultando em um valor de 24%. Visto isso, o valor relativamente baixo do limite de liquidez, aliado ao limite de plasticidade de 19% e ao índice de plasticidade de 5%, caracteriza o material como de baixa plasticidade, sugerindo reduzida sensibilidade à variação de umidade. Tal comportamento é compatível com solos de natureza predominantemente granular ou com baixo teor de argila ativa, o que é favorável para aplicações em camadas de pavimentação, desde que atendidos os demais requisitos técnicos e normativos.

Figura 19 - Ensaio de limite de liquidez do Solo Crateús

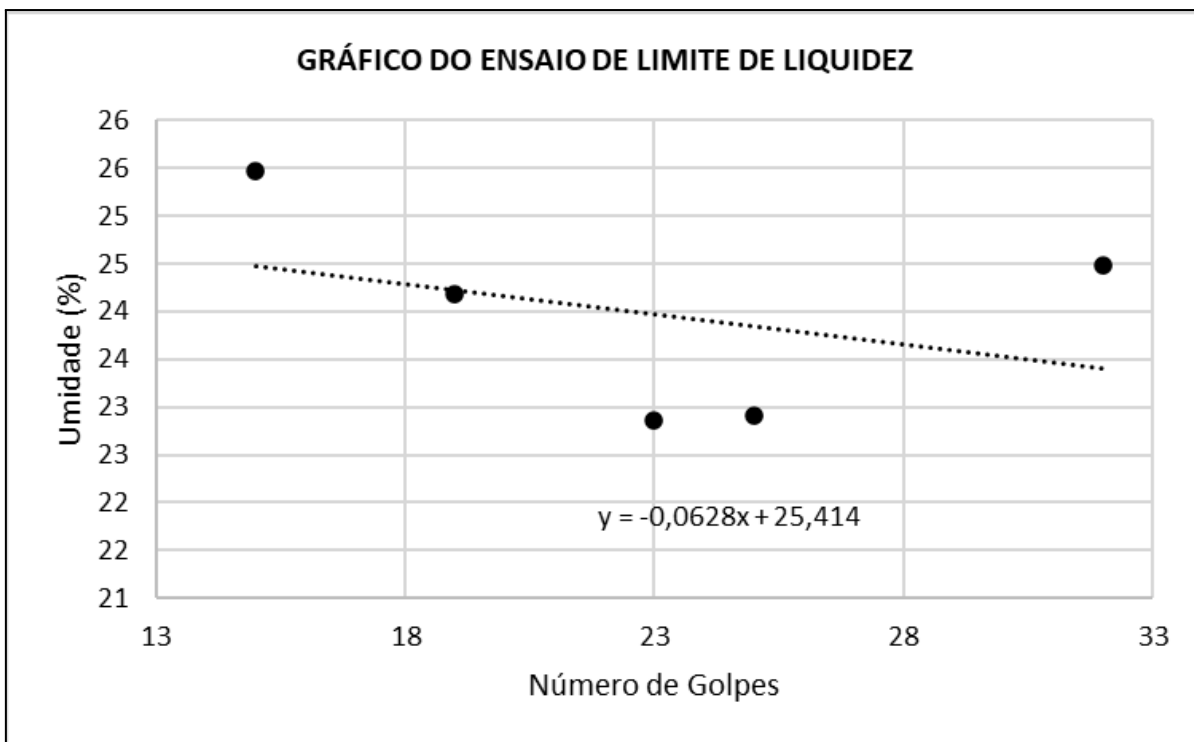


Fonte: Autoria Própria (2025)

- Limite de Liquidez (LL): 24%;
- Limite de Plasticidade (LP): 19%;
- Índice de Plasticidade (IP): 5%.

Em seguida será analisada a mistura de solo Crateús + RPCPA, o ensaio de limite de liquidez da mistura composta por solo de Crateús e resíduo. A partir da curva obtida em escala logarítmica, determinou-se o limite de liquidez correspondente ao teor de umidade associado a 25 golpes, resultando em um valor de 24%. Observa-se que os valores de umidade determinados nos diferentes corpos de prova apresentaram variação moderada, porém com tendência coerente com o comportamento esperado do material. Observe a figura 20 apresentada abaixo:

Figura 20 - Ensaio de limite de liquidez da mistura de Solo Crateús + Resíduo



Fonte: Autoria Própria (2025)

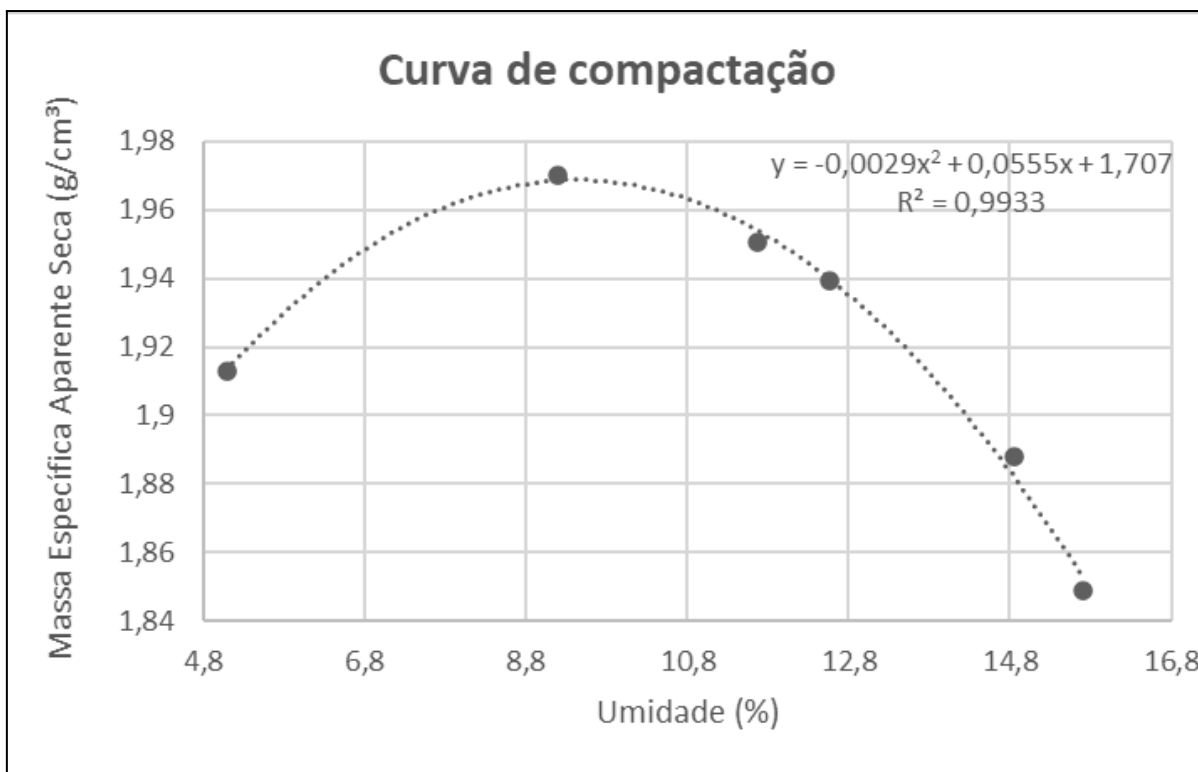
- Limite de Liquidez (LL): 24%;
- Limite de Plasticidade (LP): 20%;
- Índice de Plasticidade (IP): 4%.

Em comparação ao solo natural, observa-se que o Limite de Liquidez (LL) manteve-se constante em 24%, enquanto houve um aumento no Limite de Plasticidade (LP) de 19% para 20%. Conseqüentemente, verificou-se uma redução no Índice de Plasticidade (IP), que passou de 5% para 4%. Essa variação evidencia que a incorporação do resíduo contribuiu para a diminuição da plasticidade da mistura. Tal comportamento indica uma menor sensibilidade do material à variação de umidade, característica favorável do ponto de vista geotécnico, sobretudo para aplicações em camadas de pavimentação, desde que atendidos os demais requisitos técnicos estabelecidos pelas normas vigentes.

5.6 Curva de compactação

Na figura 21 apresenta a curva de compactação do Solo de Crateús, gerada decorrente dos dados obtidos no ensaio, a partir da curva gerada, pode-se observar os valores encontrados da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, assim observadas na tabela 3 e tabela 04 abaixo do gráfico.

Figura 21 - Curva de compactação do Solo natural de Crateús



Fonte: Autor (2025)

Tabela 3 - Massa específica aparente seca (Solo Natural)

MEAS (g/cm ³)	1,913	1,970	1,951	1,940	1,888	1,849
Umidade (%)	5,1	9,2	11,6	12,5	14,8	15,7

Fonte: Autor (2025)

Tabela 4 - Massa específica aparente seca máxima e umidade ótima (Solo Natural)

MEAS (g/cm ³)	1,970
Umidade (%)	9,6

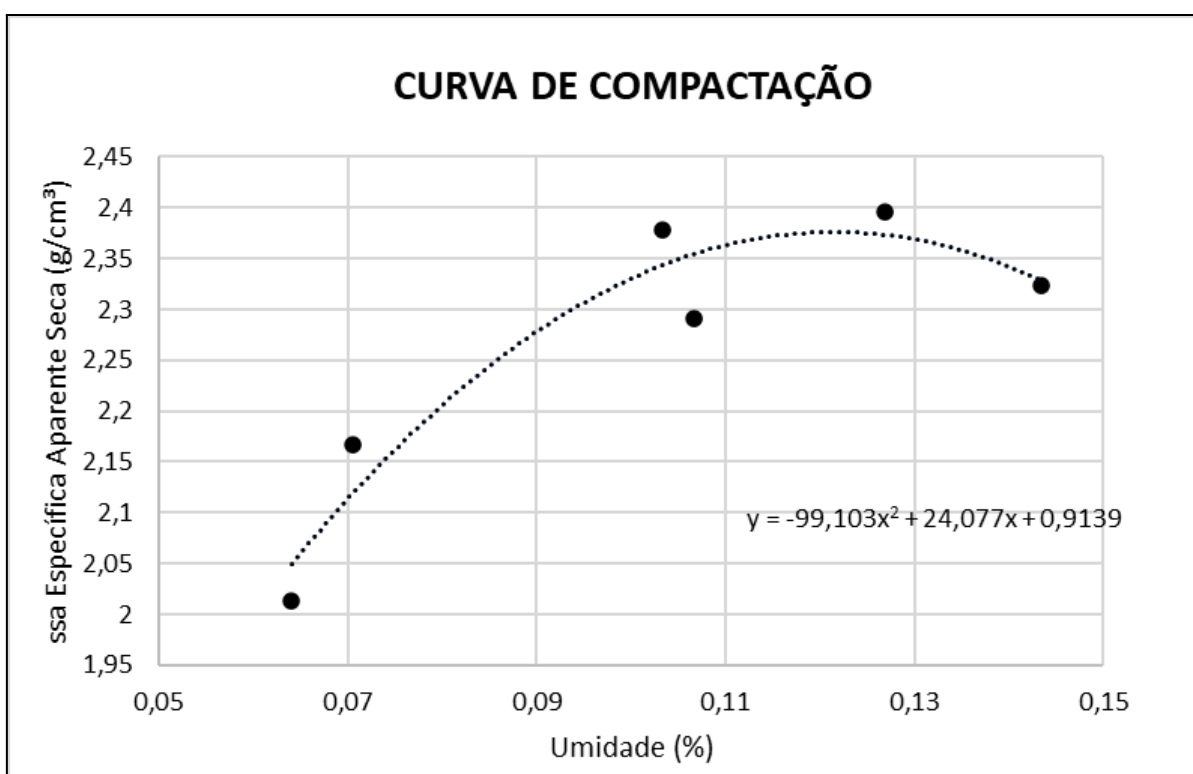
Fonte: Autor (2025)

A curva de compactação obtida evidencia o comportamento típico do material, no qual a massa específica aparente seca aumenta com o acréscimo do teor de umidade até atingir um valor máximo, seguido de decréscimo para umidades superiores. A partir do ajuste da curva e da análise dos resultados experimentais, identificou-se que a máxima densidade seca ocorre para um teor de umidade em torno de 9,6%, valor correspondente à umidade ótima de compactação do material. Esse parâmetro é fundamental para a execução e o controle

tecnológico de camadas compactadas, pois está diretamente associado à obtenção de melhor desempenho mecânico e estabilidade do material em campo.

Na Figura 22 apresenta a curva de compactação da mistura de Solo Crateús + 30 % de RPCPA, decorrente dos dados obtidos no ensaio, a partir da curva gerada, pode-se observar os valores encontrados da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, assim observadas na Tabela 5.

Figura 22 - Curva de compactação do Solo natural de Crateús + 30% de RPCPA



Fonte: Autor (2025)

Tabela 5 - Massa específica aparente seca e umidade (Mistura)

MEAS (g/cm ³)	2,01	2,17	2,38	2,29	2,39
Umidade (%)	6,4	7,0	10,3	10,6	14,3

Fonte: Autor (2025)

Tabela 6 - Massa específica aparente seca máxima e umidade ótima (Mistura)

MEAS (g/cm ³)	2,376
Umidade (%)	12,15

Fonte: Autor (2025)

A comparação entre as Tabelas 4 e 6 evidencia que a incorporação do resíduo ao solo natural resultou em um aumento na massa específica aparente seca (MEAS) e na umidade ótima. Este fenômeno é atribuído ao incremento no teor de finos da mistura, o que promove um melhor preenchimento dos vazios e, conseqüentemente, demanda uma maior quantidade de água para a reorganização das partículas. Tal necessidade hídrica justifica o aumento da umidade ótima e, de forma correlata, a elevação da massa específica aparente seca máxima (Pinto, 2006).

5.7 Módulo de resiliência

Na Tabela 7 são apresentados os resultados do módulo de resiliência evidenciam comportamento distinto entre o solo natural e a mistura com 30% de resíduo de Pedra Castelo, especialmente em função do nível de tensão confinante (σ_3).

Tabela 7 - Módulos de Resiliência médios do Solo e mistura

σ_3 (MPa)	MR SN (MPa)	MR M30 (MPa)
0,02	394,23	277,23
0,035	392,9	321,16
0,05	404,44	403
0,07	411,6	481,6
0,105	449	529,08
0,14	495,44	527,32

Fonte: Autor (2025)

Para ambos os materiais, observa-se aumento progressivo do MR com o acréscimo da tensão de confinamento, comportamento esperado para materiais granulares e solos compactados, em função da maior restrição lateral e do melhor contato entre partículas. Nas menores tensões confinantes entre 0,02 e 0,035 MPa, o solo natural apresentou valores de MR superiores aos da mistura de 30% de resíduo (M30) indicando maior rigidez inicial. Esse comportamento sugere que, em baixos níveis de confinamento, a adição do resíduo

compromete a eficiência estrutural da mistura, possivelmente devido à alteração do empacotamento das partículas e à menor coesão do material.

Entretanto, a partir de 0,05 MPa, os valores de MR da mistura M30 tornam-se equivalentes ou superiores aos do solo natural, com diferença mais pronunciada nas tensões mais elevadas. Para $\sigma_3 \geq 0,07$ MPa, a mistura com resíduo apresenta incremento significativo do módulo de resiliência, atingindo valores máximos de aproximadamente 529 MPa, superiores aos observados no solo natural. Esse comportamento indica que o resíduo contribui positivamente para o ganho de rigidez da mistura quando submetido a maiores níveis de confinamento, possivelmente em razão do efeito de intertravamento mecânico e da maior mobilização da resistência por atrito entre as partículas.

Do ponto de vista mecanístico, os resultados indicam que a mistura M30 apresenta maior sensibilidade ao confinamento, com desempenho estrutural superior ao solo natural em condições de carregamento mais severas. Tal característica é relevante para aplicações em camadas de pavimentos submetidas a maiores tensões, desde que atendidos os demais requisitos normativos e de desempenho. Assim, embora a mistura com resíduo apresenta desempenho inferior em baixos níveis de confinamento, seu comportamento sob tensões mais elevadas evidencia potencial técnico, especialmente quando analisada sob a ótica do método mecanístico-empírico.

5.8 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Para o ensaio de CBR o solo foi compactado na umidade ótima, na energia intermediária, e os resultados são observados na Tabela 8 em que o Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Expansão para o solo natural (SN) e para a mistura contendo 30% de resíduo de Pedra Castelo de coloração amarela (M30):

Tabela 8 - Resultados do CBR (%) e Expansibilidade (%)

Amostra	CBR (%)	Exp. (%)
Solo Natural (SN)	30	0,14
Solo + 30% RPCPA (M30)	9	0,31

Fonte: Autor (2025)

Os resultados dos ensaios evidenciam um comportamento geotécnico significativamente distinto entre o solo natural e a mistura com incorporação do resíduo. O solo natural apresentou CBR de 30% e expansão de 0,14%, valores que indicam boa

capacidade de suporte e baixa suscetibilidade volumétrica, compatíveis com aplicações em camadas de pavimentação. Em contrapartida, a mistura M30 apresentou redução expressiva do CBR para 9%, acompanhada de aumento da expansão para 0,31%, indicando perda significativa de desempenho mecânico.

De acordo com a Norma DNIT 139/2010 – Pavimentação: Sub-base estabilizada, que estabelece valores mínimos de Índice de Suporte Califórnia iguais ou superiores a 20% e valores máximos de expansão de até 1%, a mistura M30 não atende ao requisito de resistência, apesar de permanecer dentro do limite admissível de expansão. Dessa forma, o material torna-se inadequado quanto à capacidade de suporte, inviabilizando sua aplicação direta na camada de Sub-base de pavimentos sem tratamento adicional.

Esse comportamento pode ser atribuído ao excesso de finos presente na mistura, o qual altera a distribuição granulométrica e promove o preenchimento dos vazios. Contudo, por se tratar de um material predominantemente inerte, essa condição compromete a interação mecânica entre as partículas, reduzindo o intertravamento granular e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento. Tal interpretação é corroborada pela análise de Fluorescência de Raios X (FRX) apresentada na Tabela 7, que indica elevado teor de SiO₂ (48,97%), típico de materiais quartzosos com baixa reatividade química.

Resultados semelhantes foram observados por Islam *et al.* (2021), que identificaram redução significativa do CBR em misturas arenosas com elevado teor de finos não reativos. Embora o aumento do conteúdo de finos tenha contribuído para a redução da expansão, verificou-se um prejuízo direto à capacidade de suporte, refletido nos baixos valores de CBR. Estudos conduzidos por Souza *et al.* (2022) e Consoli *et al.* (2018) indicam que rejeitos minerais com alta competência mecânica ou submetidos a processos de estabilização química tendem a apresentar melhor desempenho estrutural, diferentemente do comportamento observado para o resíduo de Pedra Castelo em sua condição natural.

Nesse contexto, uma alternativa técnica viável consiste na aplicação de aditivos estabilizantes, conforme amplamente discutido na literatura. Trabalhos recentes, como os de Ascaño *et al.* (2025) e Consoli *et al.* (2019), demonstram que a estabilização química promove ganhos expressivos nos valores de CBR, estando diretamente relacionada ao tipo e à atuação do aditivo empregado. A utilização de compostos à base de organossilanos, por exemplo, promove modificações na interação entre as partículas do solo, favorecendo a formação de ligações químicas no interior da matriz, o aumento do intertravamento granular e a redução da sensibilidade à umidade. Como consequência, observa-se um incremento significativo da capacidade de suporte, associado à manutenção de baixos índices de

expansão.

Dessa forma, a estabilização química mostra-se uma solução eficaz não apenas para corrigir deficiências granulométricas e estruturais, mas também para viabilizar o reaproveitamento do resíduo de Pedra Castelo em camadas de pavimentação que demandam maior desempenho mecânico, contribuindo para a sustentabilidade e a economia de recursos naturais.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a caracterização geotécnica e a viabilidade de uso do resíduo de Pedra Castelo Amarela, proveniente do município de Castelo do Piauí, como material alternativo para aplicação em camadas de pavimentação rodoviária, em conjunto com o solo característico da região de Crateús-CE. Os ensaios laboratoriais indicaram que o resíduo apresenta comportamento predominantemente granular, baixa plasticidade e caráter mineral essencialmente inerte, conforme evidenciado pelas análises granulométricas, limites de Atterberg, FRX, FTIR e TGA.

Os resultados de Módulo de Resiliência evidenciaram elevada rigidez sob maiores níveis de confinamento, comportamento diretamente associado à mineralogia predominantemente silicosa do resíduo (48,97% de SiO₂), uma vez que grãos ricos em quartzo apresentam elevada rigidez intrínseca.

A incorporação de 30% do resíduo promoveu redução do limite de liquidez e do índice de plasticidade, indicando menor sensibilidade à variação de umidade, além de aumento da densificação da mistura. No entanto, a sensibilidade do Módulo de Resiliência ao nível de tensão confinante, com valores que atingiram 529 MPa, indica que o material apresenta potencial estrutural em camadas mais profundas, nas quais a restrição lateral favorece a mobilização do atrito interno dos grãos silicosos, compensando parcialmente a baixa plasticidade identificada nos limites de Atterberg. Ressalta-se, entretanto, que os resultados obtidos referem-se exclusivamente à dosagem de 30%, não sendo possível generalizar a inviabilidade do material para camadas estruturais. A literatura aponta que a variação do teor de incorporação pode alterar significativamente o comportamento mecânico e o enquadramento normativo, evidenciando a necessidade de estudos paramétricos para a definição de faixas ótimas de aplicação. Além do aspecto técnico, o reaproveitamento do resíduo contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado, reforçando a importância de investigações que conciliem desempenho mecânico, viabilidade normativa e sustentabilidade.

Em conclusão, o Resíduo de Pedra Castelo Amarela apresenta alta estabilidade mineralógica e bom desempenho resiliente sob confinamento, porém a aplicação direta na dosagem de 30% mostrou-se inviável para camadas de sub-base, em função da redução da resistência ao cisalhamento e do não atendimento à DNIT 139/2010-ES. Os resultados indicam que seu reaproveitamento deve ser direcionado a camadas de menor sollicitação mecânica ou condicionado a estudos paramétricos com teores reduzidos, possibilitando a

conversão desse passivo ambiental em um insumo alternativo sustentável para a infraestrutura rodoviária regional.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem a investigação do potencial de reaproveitamento do resíduo de Pedra Castelo Amarela em pavimentação rodoviária. Sugere-se a realização de estudos de dosagem, com teores de incorporação reduzidos, variando entre 5% e 25%, visando identificar a faixa ótima que possibilite o atendimento ao requisito normativo mínimo de $CBR \geq 20\%$ para camadas de sub-base.

Além disso, a estabilização química da mistura constitui uma alternativa promissora, devendo ser avaliada por meio da adição de agentes estabilizantes, como cimento Portland ou cal, com o objetivo de promover coesão química ao esqueleto granular inerte do resíduo e melhorar a capacidade de suporte do material.

Outro aspecto relevante refere-se à avaliação ambiental do resíduo, recomendando-se a execução de ensaios de lixiviação e solubilização, conforme as normas ABNT NBR 10005 e NBR 10006, a fim de assegurar a segurança ambiental do material em aplicações em larga escala, especialmente quanto ao potencial de liberação de elementos-traço.

Por fim, sugere-se investigar a aplicação do resíduo em camadas de menor sollicitação mecânica, como reforço de subleito ou em vias vicinais de baixo volume de tráfego, onde os requisitos normativos de resistência são menos rigorosos. Essa abordagem pode viabilizar o reaproveitamento do resíduo de forma técnica e ambientalmente adequada, contribuindo para a redução de passivos ambientais e para a adoção de soluções mais sustentáveis na infraestrutura rodoviária.

REFERÊNCIAS

ABIROCHAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **O setor brasileiro de rochas ornamentais em 2018**. Brasília, DF: ABIROCHAS, 2018.

ABIROCHAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balanco das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2020**. Brasília, DF: ABIROCHAS, 2020.

ABIROCHAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balanco do setor brasileiro de rochas ornamentais e de revestimento em 2024**. Brasília, DF: ABIROCHAS, 2024.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2025.

ADUNOYE, G. O. **Fines content and angle of internal friction of a lateritic soil: an experimental study**. *American Journal of Engineering Research*, v. 3, n. 3, p. 16–21, 2014.

ALENCAR, C. R. A. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais**. Cachoeiro de Itapemirim, ES: IEL, 2013.

ALVES, A. F. **Caracterização geológica e potencial econômico das rochas ornamentais do município de Castelo do Piauí – PI**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

ASCAÑO, G. Z.; RODRIGUEZ, R. S.; FLORES, V. A. A. **Aprimoramento do desempenho de pavimentos por meio da nanotecnologia de organossilanos: melhoria do índice de rugosidade e da capacidade de carga.** 2025.

BAYLÃO, M. C. C.; WANDER, A. E. **Setor de produção de rochas ornamentais: uma revisão sistemática da literatura.** *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 11, n. 14, e316111436278, 2022.

BEAUVAIS, A.; BERTAUX, J. **Caracterização e diferenciação in situ de caolinitas em perfis de intemperismo laterítico usando microespectroscopia infravermelha.** *Clays and Clay Minerals*, v. 50, n. 3, p. 314–330, 2002.

BENITES, V. M. et al. **Caracterização de argilas por espectroscopia no infravermelho.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, n. 2, p. 343–352, 1999.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2010.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço.** Norma DNIT 139/2010-ES. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

BRITO, R. S. **Avaliação do setor de rochas ornamentais no estado do Piauí com ênfase no município de Castelo do Piauí.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2015.

CARLETE, B. A.; CASTRO, N. F.; SILVA, H. V. **Caracterização de agregados minerais provenientes de resíduos grosseiros de rochas ornamentais.** In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 24., Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2016.

CENTROROCHAS – CENTRO BRASILEIRO DOS EXPORTADORES DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Relatório setorial de rochas ornamentais**. Vitória, ES, 2022.

CHIODI FILHO, C. **Aspectos técnicos e econômicos do setor de rochas ornamentais**. São Paulo: ABIROCHAS, 2003.

CHIODI FILHO, C. **A geodiversidade brasileira e a competitividade do setor de rochas ornamentais**. São Paulo: ABIROCHAS, 2021a.

CONSOLI, N. C. et al. **Soil stabilization with cement, lime and chemical additives**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018–2019.

COSTA, J. A. et al. **Aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais na construção civil**. *Revista Matéria*, v. 23, n. 2, 2018.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Principles of geotechnical engineering**. 9. ed. Boston: Cengage Learning, 2018.

DE CAMPOS, A. R. et al. **Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental**. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, VII., 2009.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to the rock-forming minerals**. 2. ed. London: Longman, 1992.

DICK, D. P. et al. **Química da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: UFRGS, 2008.

FERREIRA, R. S. et al. **Caracterização térmica de materiais argilosos por análises TG e DTG**. *Cerâmica*, v. 70, n. 394, p. 1–10, 2024.

GRIM, R. E. **Clay mineralogy**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1968.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Perfil econômico do estado do Piauí**. Rio de Janeiro, 2022.

ISLAM, M. A. et al. **Effect of fine content on shear strength behavior of sandy soil**. *Construction and Building Materials*, 2021.

JENKINS, R. **X-ray fluorescence spectrometry**. 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 1999.

LECHHEB, H. et al. **Thermal behavior and characterization of metakaolinite materials.** *Applied Clay Science*, 2021.

MARTINS, V. P. **Caracterização mineralógica de materiais geológicos por espectroscopia no infravermelho.** 2009. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior.** 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

PETTIJOHN, F. J.; POTTER, P. E.; SIEVER, R. **Sand and sandstone.** 2. ed. New York: Springer, 1987.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RODRIGUES, R. S. **Análise da eficácia de ácidos e métodos de tratamento na remoção da oxidação em quartzito ornamental.** 2024. Trabalho de Iniciação Científica – CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, 2024.

SENÇO, W. **Manual de pavimentação.** São Paulo: Pini, 2008.

SOUZA, J. C. et al. **Rejeitos minerais e aplicações em pavimentação.** *Revista Matéria*, 2022.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

TAGUCHI, S. P. et al. **Aproveitamento de resíduos da indústria de rochas ornamentais na construção civil.** *Revista Matéria*, v. 19, n. 3, p. 312–320, 2014.

VIDAL, F. W. H.; PADILHA, M. W. M.; ALMEIDA, J. R. **Rochas ornamentais no Brasil: tecnologia, produção e mercado.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2006.