



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CAMPUS DE PAU DOS FERROS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Adriana Correia de Moraes

**INFLUÊNCIA DO PÓ DE MARMORARIA NOS PARÂMETROS
GEOTÉCNICOS DE SOLO CIMENTO COMPACTADO**

Pau dos Ferros-RN

2025

Adriana Correia de Moraes

**INFLUÊNCIA DO PÓ DE MARMORARIA NOS PARÂMETROS
GEOTÉCNICOS DE SOLO CIMENTO COMPACTADO**

Monografia apresentada à
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção
do título de Bacharela em Engenharia
Civil.

Orientador: José Daniel Jales Silva.
Prof. Dr.

Coorientador: Vinícius Navarro
Varela Tinoco. Eng. Me.

Pau dos Ferros-RN

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M828i Moraes, Adriana Correia de.
 Influência do Pó de Marmoraria nos Parâmetros
 Geotécnicos de Solo Cimento Compactado / Adriana
 Correia de Moraes. - 2025.
 66 f. : il.

 Orientador: José Daniel Jales Silva.
 Coorientador: Vinícius Navarro Varela Tinoco.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
 2025.

 1. Melhoramento. 2. Solo laterítico. 3. Pó de
 mármore. 4. Resistência à compressão. I. Silva,
 José Daniel Jales, orient. II. Tinoco, Vinícius
 Navarro Varela, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

 Biblioteca Campus Pau dos Ferros
 Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
 CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Adriana Correia de Moraes

**INFLUÊNCIA DO PÓ DE MARMORARIA NOS PARÂMETROS
GEOTÉCNICOS DE SOLO CIMENTO COMPACTADO**

Monografia apresentada à
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção
do título de Bacharela em Engenharia
Civil.

Defendida em: 31 / 07 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

José Daniel Jales Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Vinícius Navarro Varela Tinoco, Eng. Me. (UFERSA)
Coorientador

Cláwsio Rogério Cruz de Sousa, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Matheus Fernandes de Araújo Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

À minha mãe, por me ensinar e dar
condições de ser quem eu sou e me
deixar sonhar livremente com meu
caminho e escolhas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir realizar esse trabalho e concluir mais uma fase na minha vida acadêmica, me dando a capacidade necessária, mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço de imenso a meu orientador Professor Dr. José Daniel Jales Silva, por permanecer paciente e acreditar em mim, além de estar sempre disposto e disponível a tirar minhas dúvidas e me dar conselhos, mesmo antes de surgir uma proposta de TCC.

Ao meu coorientador, o Engenheiro Vinicius Navarro Varela Tinoco, você foi fundamental na construção desse trabalho, suas contribuições são sempre bem-vindas e sua ajuda em ensaios e na moldagem dos corpos de prova foram, sem sombra de dúvidas, imprescindíveis.

A meu amigo Mateus, não só por ter me ajudado a coletar solo, mas por sempre estar junto quando necessário, pode ter certeza que a recíproca é verdadeira.

Aos meus amigos, que estiveram no meu caminho, as vezes ajudando em laboratório, as vezes me escutando, me aconselhando ou tomando alguma carga que me ajudasse. Maycon, Natália, Nívia, Victor, Adalberto e Gabriel, vocês fazem parte dessa história.

Ao Professor Dr. Cláwsio Rogério Cruz de Sousa e ao Professor Dr. Matheus Fernandes de Araújo Silva, vocês também foram alvo das minhas “palestras” sobre TCC e afins desde o começo, agradeço sempre pela disponibilidade e abertura comigo.

Aos meus professores, e nisso incluo Navarro, agradeço também, a confiança que sempre!

À minha mãe e irmã, por estarem sempre comigo, me apoiando em tudo e sempre tentando ajudar e sendo o meu alicerce, eu não estaria onde e como estou sem vocês, que sempre são as que mais confiam na minha capacidade e me fazem tentar sempre dar o meu melhor sempre.

Ao meu tio Cleomar, por ser uma das pessoas que eu posso contar sempre, obrigada por estar sempre cuidando de nós.

EPÍGRAFE

“Transportai um punhado de terra
todos os dias e fareis uma montanha.”

Confúcio

RESUMO

O solo é um material de fundamental importância na construção civil, presente das mais antigas às mais modernas construções, desempenhando papel imprescindível em grandes e pequenas obras. O solo laterítico, muito abrangente no Brasil, é frequentemente utilizado na pavimentação, e em alguns casos, precisa de melhoramento. Esse melhoramento, com uso de resíduos, desempenha funções de otimizar as propriedades físicas e químicas do solo, evidenciando as características dos dois materiais combinados, além de dar destinação adequada ao resíduo. No intuito de investigar a influência da adição do pó de mármore e da variação da umidade de compactação em solo laterítico estabilizado com cimento, a pesquisa partiu do pressuposto que a adição de resíduos de mármore modifica as propriedades geotécnicas do solo, tais como granulometria, plasticidade e compactação, bem como, umidade ótima, densidade máxima e resistência à compressão do solo compactado, aumentando o desempenho e contribuindo na redução de impactos ambientais negativos que o descarte inadequado do pó de mármore ocasiona ao ambiente. Para isso, foram preparadas quatro formulações: uma de referência, com solo e 10% de cimento, e outras três com a mesma proporção de cimento, mas com 10%, 20% e 30% de resíduo de mármore. Cada amostra foi compactada em três condições de umidade (2% abaixo, na umidade ótima e 2% acima). As misturas foram submetidas a ensaios de caracterização geotécnica - granulometria, limites de Atterberg e compactação - e de desempenho - compactação, absorção, retração volumétrica e resistência à compressão simples. Os resultados indicaram que a adição do resíduo de mármore influenciou significativamente a plasticidade e a umidade ótima das misturas. Também foi observado que a retração volumétrica dos corpos de prova diminuiu com o aumento do teor de resíduo, especialmente na formulação com 30%, o que indicou maior estabilidade dimensional. O pó de mármore demonstrou comportamento semelhante ao de materiais pozolânicos, contribuindo para a melhoria nas propriedades mecânica e física do solo, sendo uma alternativa sustentável promissora para aplicação em obras de infraestrutura.

Palavras-chave: melhoramento; solo laterítico; pó de mármore; resistência à compressão.

ABSTRACT

Soil is a material of fundamental importance in civil construction, present from the oldest to the most modern structures, playing a crucial role in both large and small scale projects. Lateritic soil, which is very common in Brazil, is often used in paving and, in some cases, requires improvement. This improvement, using waste materials, serves to optimize the soil's physical and chemical properties, highlighting the characteristics of the two combined materials while also providing a proper use for the waste. To investigate the influence of adding marble powder and varying compaction moisture on cement-stabilized lateritic soil, this research started from the premise that adding marble waste modifies the soil's geotechnical properties, such as particle size distribution, plasticity, and compaction. It also influences the optimal moisture content, maximum density, and compressive strength of the compacted soil, which increases performance and helps reduce the negative environmental impacts caused by the improper disposal of marble powder. For this purpose, four formulations were prepared: a reference formulation with soil and 10% cement, and three others with the same cement proportion but with 10%, 20%, and 30% marble waste. Each sample was compacted at three moisture conditions (2% below, at the optimum moisture content, and 2% above). The mixtures were subjected to geotechnical characterization tests - particle size distribution, Atterberg limits, and compaction - and performance tests - compaction, absorption, volumetric shrinkage, and unconfined compressive strength. The results indicated that the addition of marble waste significantly influenced the plasticity and optimal moisture content of the mixtures. It was also observed that the volumetric shrinkage of the test specimens decreased with the increase in waste content, especially in the 30% formulation, which indicated greater dimensional stability. The marble powder behaved similarly to pozzolanic materials, contributing to the improvement of the soil's mechanical and physical properties and presenting a promising sustainable alternative for use in infrastructure projects.

Keywords: improvement; Lateritic soil; marble powder; unconfined compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de solo Laterítico no Brasil	19
Figura 2 – Procedimento metodológico	24
Figura 3 – Localização de coleta de solo	25
Figura 4 – Solo laterítico local	26
Figura 5 – Solo laterítico coletado	26
Figura 6 – Oficina de beneficiamento	27
Figura 7 – Lama de marmoraria	28
Figura 8 – Resíduo de mármore coletado	29
Figura 9 – Teores escolhidos	30
Figura 10 – Fluxograma de ensaios	31
Figura 11 – Corpos de prova em processo de cura	32
Figura 12 – Quarteamento de amostra	34
Figura 13 – Conjunto de peneiras	35
Figura 14 – Esquema de classificação SUCS	37
Figura 15 – Esquema de classificação HRB	38
Figura 16 – Aparelho de Casagrande	39
Figura 17 – Moldagem de cilindro de solo	40
Figura 18 – Compactação de solo	41
Figura 19 – Ensaio de Resistência	42
Figura 20 – Obtenção de medidas dos corpos de prova	43
Figura 21 – Retração de CP	44
Figura 22 – Curva granulométrica do pó de mármore	46
Figura 23 – Comparação de curvas granulométricas	47
Figura 24 – Composição de misturas	48
Figura 25 – Limites de liquidez das misturas	50
Figura 26 – Comparação de curvas de compactação das misturas	52
Figura 27 – Comparação entre resistência de misturas	53
Figura 28 – Curvas comparação de retração volumétrica	55
Figura 29 – Comparação de resistência de misturas com a mudança de tempo de cura	57
Figura 30 – CPs antes de ensaio de absorção	59

Figura 31 – Corpos de prova com 4 horas de ensaio.....	59
Figura 32 – Corpos de prova à 24 horas de ensaio	60
Figura 33 – Corpos de prova com 48 horas de duração de ensaio.....	60
Figura 34 – Corpos de prova rompidos	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Nomenclatura de ensaios.....	33
Quadro 2 - Nomenclatura de caracterização.....	33
Quadro 3 - Valores de CNU e CC	36
Quadro 4 - Composição de solos.....	37
Quadro 5 - Limites de Plasticidade de misturas	50
Quadro 6 - Dados de retração de misturas	56

LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CC	Coeficiente de Curvatura
CNU	Coeficiente de Não Uniformidade
CP	Corpo de prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
HRB	<i>Highway Research Board</i>
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	GERAIS	18
2.2	ESPECÍFICOS	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	SOLO LATERÍTICO	19
3.2	PÓ DE MÁRMORE	20
3.3	MELHORAMENTO DE SOLO	21
4	METODOLOGIA.....	24
4.1	MATERIAIS	25
4.1.1	Solo.....	25
4.1.2	Resíduo de pó de mármore	27
4.1.3	Cimento	29
4.2	MISTURA DE SOLO E RESÍDUO.....	30
4.2.1	Definição de Misturas	30
4.2.2	Preparação de corpos-de-prova	31
4.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	33
4.3.1	Preparação de amostras para ensaios de caracterização	33
4.3.2	Granulometria	34
4.3.3	Caracterização das misturas	35
4.3.4	Limites de Atterberg.....	38
4.3.5	Compactação.....	40
4.4	ENSAIOS DE DESEMPENHO NAS AMOSTRAS.....	41
4.4.1	Resistência à compressão simples.....	41
4.4.2	Retração volumétrica	42
4.4.3	Modificação de tempo de cura	44
4.4.4	Absorção de água.....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1	CARACTERIZAÇÃO	46
5.1.1	Granulometria	46
5.1.2	Índices de plasticidade.....	49
5.1.3	Compactação.....	51

5.2	DESEMPENHO DE MISTURAS	53
5.2.1	Resistência à Compressão Simples	53
5.2.2	Retração Volumétrica	55
5.2.3	Mudança de Tempo de Cura	56
5.2.4	Absorção.....	59
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

O solo é um material natural usado desde o início da humanidade, sendo essencial na construção civil e principal componente de inúmeras estruturas que resistem ao tempo, como as pirâmides do Egito. Além disso, ele desempenha um papel crucial em grandes obras de terraplenagem, barragens, fundações, aterros e estradas. Entretanto, as construções modernas não dependem apenas do solo; a combinação de diversos materiais resulta em materiais compósitos com comportamentos variados, que são influenciados pelas proporções utilizadas em suas misturas.

O solo é composto por partículas de água, ar e grânulos resultantes do intemperismo de rochas, que ocorre por decomposição química ou ações mecânicas. A maneira de formação do solo, assim como os agentes químicos e físicos, influenciam diretamente no seu comportamento e em suas propriedades, devido a interação entre as partículas, que variam características como formato e tamanho, alteram as propriedades físico-químicas (Caputo; Caputo, 2022; Pinto, 2006).

Um dos tipos de solo mais abundantes na região nordeste do Brasil, é o solo laterítico. Eles se originam da alteração de solos residuais com baixo teor de sílica (SiO_2). Esses solos apresentam elevada concentração de ferro (Fe) e alumínio (Al), o que proporciona uma certa cimentação natural (Almeida *et al.*, 2024). Apesar de possuir um grande potencial, esses solos geralmente são descartados inadequadamente ou melhorados com outro material que otimize suas propriedades geotécnicas.

Segundo DNIT (2022), o processo de melhoria de características de solos com a adição de um ou mais materiais, com a finalidade de obter propriedades de estabilidade e durabilidade adequadas é conhecido como estabilização de solos. Além disso, a estabilização de solo pode proporcionar a diminuição de deformabilidade, permeabilidade e sensibilidade à umidade; e aumento de resistência mecânica (Romanini, 2020).

A operação para melhoria e estabilização do solo visa otimizar suas propriedades, permitindo que ele adquira características que, em sua forma natural, não seriam alcançadas. Esse processo também contribui para aplicação

do processo de desmaterialização, com a substituição desses materiais com maior impacto ambiental negativo ao ambiente de forma sustentável, especialmente quando a estabilização é realizada com o uso de resíduos.

A produção e uso de recursos naturais são fatores ligados diretamente ao avanço da sociedade, desde aumento populacional e consequente aumento de consumo, até avanços tecnológicos. E o setor da construção civil representa cerca de 30% de todos os resíduos gerados no mundo; no Brasil a geração gira em torno de 14,5% (Lopes *et al.*, 2023). E o descarte inadequado de materiais traz prejuízos não só sociais, mas econômicos e naturais.

De acordo com Kurdi *et al.* (2025), a mineração e a produção de mármore geram aproximadamente 200 milhões de toneladas de resíduos em todo o mundo, causando impactos ambientais irreversíveis, além de afetar a saúde pública e os ecossistemas. No entanto, o resíduo de mármore pode ser reaproveitado em diversas aplicações, como na construção de rodovias, na composição de agregados para cimento, argamassa e concreto, na fabricação de tijolos e outros materiais de construção, além de servir como substituto de materiais como argila e fíler.

Os resíduos de mármore são gerados em grande volume no Brasil e no mundo, devido ao uso frequente de peças ornamentais na construção civil. E seu descarte, se feito de forma inadequada, pode alterar o pH do solo, afetando fauna e flora, além de contaminar rios, lagos e aumentar ocupação em lixões e contribuir com a poluição (Passalini; Holanda, 2023).

A adição de resíduos ao solo estabilizado faz com que seja possível não só a sustentabilidade do ambiente e diminuição de custos, se comparados a produtos convencionais, como também o estudo das características atreladas a cada material e as influências dos mesmos, sendo possível uma comparação entre índices influenciados pelos materiais adicionados e suas composições.

De acordo com Sufian *et al.* (2024), a incorporação de resíduo de mármore em solos argilosos e cimentos aumenta a capacidade de absorção de água e a porosidade, ao mesmo tempo em que reduz a densidade aparente e a resistência mecânica.

Segundo Fathonah *et al.*, (2023), Umar e Lin (2024) e Jassim *et al.* (2022), a incorporação de pó de mármore em solos de alta plasticidade, como os solos

argilosos, contribui para reduzir os índices de plasticidade, diminuir a densidade e umidade ótima e aumentar a resistência do solo estabilizado.

Esses resultados indicam que a mistura de resíduo de mármore com solo apresenta um comportamento distinto em relação à sua adição ao cimento. Isso evidencia que o potencial de reatividade do mármore são fatores relevantes a serem considerados ao avaliar a viabilidade de seu uso em diferentes aplicações, levantando dúvidas sobre como o resíduo se comportaria ao ser incorporado em outros tipos de solo.

2 OBJETIVOS

2.1 Gerais

Analisar a influência da substituição do resíduo de mármore em solo laterítico estabilizado com cimento e compactado com diferentes teores de umidade.

2.2 Específicos

- Avaliar a influência do teor de resíduo nos parâmetros de compactação do solo estabilizado.
- Mensurar o efeito da umidade de compactação na resistência à compressão do solo estabilizado.
- Verificar a influência da adição do resíduo na resistência à compressão do solo cimento compactado.
- Investigar como a substituição de resíduo afeta o índice de retração do solo laterítico estabilizado compactado.
- Estimar os efeitos de mudança de tempo de cura no desempenho mecânico do solo cimento compactado.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Solo laterítico

No início do século XIX o termo laterita foi criado para denominar um material produto ferruginoso proveniente da alteração do granito da região de Malabar, na Índia, com propriedade de ser cortado em blocos ao ser extraído da jazida e ter capacidade de endurecer quando exposto ao ar (Mélo, 2011).

Os solos lateríticos são solos superficiais resultantes do processo de laterização, correspondente à intemperização da camada superior de partes bem drenadas de regiões intertropicais, como América do Sul, Índia, África, Austrália e Sudoeste Asiático, com estimativa de cerca de 19% do território mundial sendo composto por esse tipo de solo (Farias, 2023). A Figura 1 mostra a distribuição de solo laterítico no Brasil.

Figura 1 – Distribuição de solo Laterítico no Brasil



Ainda de acordo com a pesquisa de Farias (2023), por ser um solo rico em óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio e permanências de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) como argilomineral, o solo laterítico possui colorações vermelho, amarelo, marrom e alaranjado, além de contribuir com uma maior retenção de água, melhor estabilidade e coesão, e conferir um aspecto cimentado às suas

partículas, uma vez que os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio recobrem a caulinita.

Entretanto, solos lateríticos podem apresentar sensibilidade à variação de umidade, quando secam, pode haver o surgimento de fissuras por retração e quando muito úmidos, podem se tornar um solo mole. Esse comportamento pode ocasionar a diminuição da resistência do solo compactado, provocando falhas e acidentes em obras de engenharia (Tan *et al.*, 2020).

Devido suas características de resistência e seu potencial como material de construção, o solo laterítico é bem empregado em construções como componente para camadas de base e sub-base em obras de pavimentação. Por outro lado, devido sua composição variada, alguns deles não satisfazem determinadas especificações de obras, tornando necessário a estabilização do solo.

A estabilização de solo é um processo que visa tornar estável um solo através do melhoramento de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, podendo influenciar na melhoria de grau de compactação, aumento de durabilidade, redução de expansão e índices de plasticidade, além do aumento da resistência e carga de suporte do solo (Mélo, 2011).

3.2 Pó de mármore

O mármore é um calcário metamórfico cristalino constituído principalmente por cal (CaO), em cerca de 94% da sua composição, calcita (CaCO₃), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), e óxidos alcalinos (Na₂O, K₂O), além de apresentarem teores na ordem de 0,30% de ferro (Silva *et al.*, 2005 e Fathonah *et al.*, 2023).

De acordo com Carvalho *et al.* (2023), Silva *et al.* (2005) e Associação Brasileira de Rochas Naturais (2025), o Brasil é um dos maiores produtores de rochas ornamentais do mundo, tendo comercializado cerca de 9,3t no primeiro trimestre de 2023 e possuindo um faturamento anual de 2024 cerca de 12,7% acima do ano anterior. Apesar disso, as perdas no processamento do produto, desde a sua extração ao refino para o consumidor, podem ser estimadas em até 40% e uma produção de resíduo de até 25% do montante inicial da rocha.

Esse resíduo, muitas vezes, é descartado de forma inadequada, sem nenhum tratamento em leitos de rios, pátios de marmorarias e aterros. Apesar de esse resíduo ser inerte, ao entrar em contato com o meio ele afeta não só a paisagem natural, como chega a assorear rios e poluir e degradar o ambiente (Silva *et al.*, 2005). Apesar de ser classificado tecnicamente como um resíduo sólido industrial não perigoso, o pó de mármore pode ser tratado como resíduo similar ao resíduo da construção civil (RCC) Classe A, então deve ser tratado de acordo com a resolução Conama nº 307 de 2002.

O processo de obtenção do pó de mármore se dá quando acontece o corte e polimento das peças. São utilizadas serras para cortar as placas de mármore, com a adição de água, a fim de se preservar a ferramenta de trabalho, reduzir a poeira e resfriar do conjunto, já que o corte gera certo atrito e a água ajuda na lubrificação, além de melhorar o corte das peças.

O resíduo mais fino gerado no corte se mistura à água utilizada no processo e após se acumular em quantidade significativa, é descartado e armazenado em montes, para sua destinação adequada. O resíduo misturado com água é chamado de lama de marmoraria.

Segundo pesquisa de Carvalho *et al.* (2023), devido sua função de efeito fíler, materiais com granulometria média semelhante ou inferior ao cimento, o pó de mármore pode ser utilizado no intuito de preencher vazios em estruturas granulométricas mais uniformes e conceder maiores resistências, diminuir poros e encurtar a conectividade entre partículas, além de diminuir a relação água/cimento, se adicionado a uma matriz conjunta ao cimento.

Outra característica do resíduo é a possibilidade do processo de formação de cimentação entre partículas e reações pozolânicas, quando misturado ao solo e água (Tenório, 2019), demonstrando que sua adição em solo produz uma eficácia no melhoramento, contribuindo não só para construções, como para a redução do material descartado de maneira inadequada no ambiente.

3.3 Melhoramento de solo

A estabilização de solo consiste no melhoramento das propriedades mecânicas, químicas, físicas, hidráulicas e de deformabilidade do solo, no intuito de tornar esse material adequado para uma aplicação específica. Essa

estabilização promove cimentação das partículas e otimização de parâmetros de resistência dos solos (Tenório, 2019). Esse processo é comumente realizado com o uso de cal ou cimento, já que esses materiais oferecem características esperadas para a estabilização de solo.

Segundo pesquisas de Tenório (2019), a ação de tratar os solos com cimento é muito comum em vários países, já que estes possuem resistência mecânica elevada por causa das reações de hidratação do material, que originam fortes ligações entre partículas, além de tornar o material menos permeável. Em adição a isso, os solos melhorados com os chamados materiais alternativos que mitigam os impactos de custos e impactos ambientais negativos, que podem diminuir os custos de operação, além de destinar os resíduos de maneira adequada.

Em pesquisas de Sufian *et al.* (2024) destacam que o uso de diversos resíduos de materiais pó de casca de arroz, cinza volante, sílica ativa, pó de madeira, escórias e pó de vidro contribuem com as modificações das características do solo, aprimorando características como resistência, plasticidade, porosidade, absorção de água e índices de expansão e retração do solo.

Ainda de acordo com Tenório (2019), é possível utilizar o resíduo de mármore como corretor de acidez de solo. E se observado o comportamento de solos melhorados com o resíduo, ocorre um aumento de resistência na compressão simples e diminuição na permeabilidade, além do controle de expansão do solo.

Outras duas características mencionadas por Tenório (2019) é a umidade ótima, que aumenta à medida em que se incrementa o teor de resíduo de mármore, e a coesão das partículas, que também é diretamente proporcional ao teor de resíduo. O aumento de coesão pode contribuir significativamente com o aumento de plasticidade de uma mistura solo-resíduo, afetando a trabalhabilidade do material.

Cruz *et al.*, (2020) e Rafi *et al.* (2025) investigaram a influência do pó de mármore quando incorporado ao cimento. Cruz *et al.* (2020) estudou a substituição parcial do cimento por pó de mármore em 10 e 20% obtendo um aumento na resistência à compressão simples de 1,05% na substituição de 10%

de pó de mármore e uma redução na resistência de 0,94%, afirmando que quanto mais resíduo na mistura com cimento, menos resistência ela apresenta. Além de ocorrer uma diminuição na absorção de água.

Já Rafi *et al.* (2025) substituíram frações de 3,5 a 4,5% de cimento e areia por pó de mármore, obtendo que houve redução na resistência à compressão das misturas em relação ao concreto base de até 20%. Enquanto a absorção de água aumentou, proporcional ao aumento de resíduo.

Sufian *et al.* (2024) realizaram pesquisas na substituição de pó de mármore em solo argiloso para a fabricação de tijolos, os tijolos com a substituição entre 5 e 20%. Chegando a resultados de até 70% de diminuição da resistência à compressão, quando comparados ao tijolo com apenas solo, que está alinhado ao aumento de porosidade e absorção de água nas amostras da pesquisa.

Fathonah *et al.* (2023) investigaram a adição de 7 a 27% de pó de mármore em solo, obtendo que a influencia do resíduo aumentou a umidade ótima das misturas em de 24 a 29% de acordo com o aumento do resíduo. Em relação aos índices de plasticidade, eles obtiveram que quanto maior o teor de resíduo, menor o índice de plasticidade. Uma vez que as reações entre pó de mármore e água aceleram, aumentando a estabilidade de agregados do solo e reduzem a tendência do solo de se deformar.

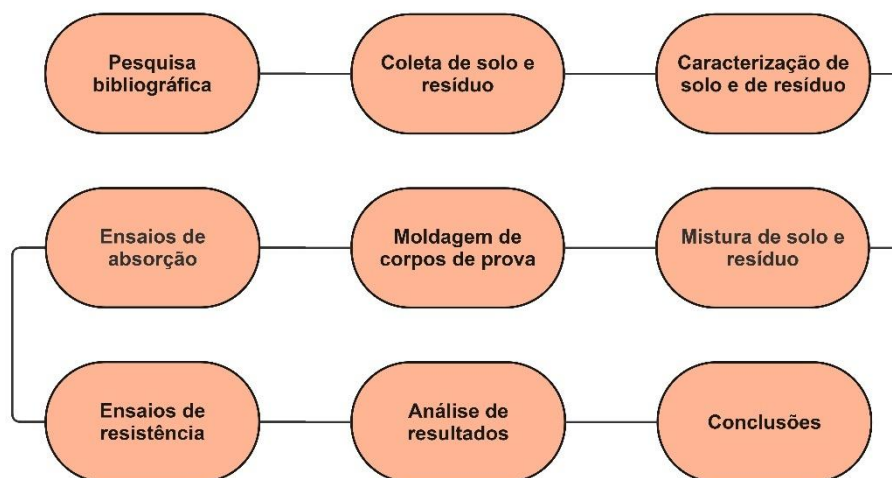
Por outro lado, as pesquisas de Jassim *et al.* (2022) e Umar; Lin (2024) resultaram em redução na resistência à compressão e umidade ótima conforme o aumento do teor de resíduo. Os índices de plasticidade obtidos refletiu na pesquisa de Fathonah *et al.* (2023), em que quanto maior a quantidade de resíduo, menor o índice de plasticidade.

4 METODOLOGIA

Este estudo adotou o método experimental para investigar os parâmetros geotécnicos de um solo estabilizado com adição de cimento e resíduo de pó de mármore. A pesquisa possui abordagem quantitativa e qualitativa, sendo caracterizada como de natureza exploratória.

Os procedimentos metodológicos, descritos na Figura 2, iniciaram-se com uma pesquisa bibliográfica para fornecer embasamento teórico. A seguir, foi realizada a coleta e caracterização do solo e do resíduo em laboratório. Após essa etapa, foram preparadas quatro diferentes misturas, compostas por solo, cimento e diferentes teores de pó de mármore. Cada uma dessas misturas foi caracterizada e submetida a ensaios para avaliar as propriedades de cada mistura. Por fim, os resultados obtidos foram analisados, permitindo a formulação das conclusões da pesquisa.

Figura 2 – Procedimento metodológico



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

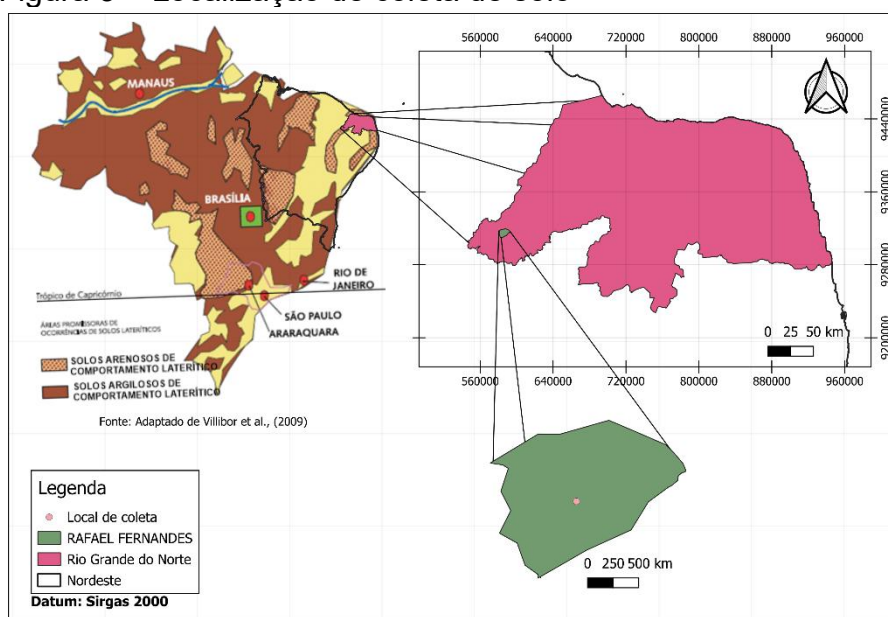
Em seguida, foi feita uma comparação entre os parâmetros de cada mistura. Entre os parâmetros analisados estão a caracterização do material, feita através de granulometria, limites de plasticidade e compactação, e ensaios de desempenho, sendo analisada a resistência à compressão simples, índice de retração e mudança de tempo de cura do solo melhorado compactado. Em adição a isso, foram também realizados ensaios de absorção de água, para fins de análise. Os descritos parâmetros são obtidos através de ensaios realizados conforme suas respectivas normas regulamentadoras.

4.1 Materiais

4.1.1 Solo

O solo laterítico local, coletado na cidade de Rafael Fernandes – RN, coordenadas UTM 24S 585591.49E 9314222.21S, foi escolhido por ser um dos tipos de solo mais abundantes na região da pesquisa. O mapa da Figura 3 mostra a localização da coleta do solo, alinhado aos perfis característicos de solo ilustrado por Villibor *et al.* (2009).

Figura 3 – Localização de coleta de solo



Fonte: IBGE (2024)

Na Figura 4, foi possível a visualização do monte formado pelo solo de onde foram retiradas amostras de solo amolgadas, com uso de pá e enxada.

Figura 4 – Solo laterítico local



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

O solo coletado apresenta coloração avermelhada com aparente boa distribuição de grãos e sem grande contribuição de matéria orgânica, conforme avaliação visual realizada no local de coleta. Na Figura 5 foi possível a visualização do solo coletado.

Figura 5 – Solo laterítico coletado



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

As amostras foram então encaminhadas para o laboratório para preparação e realização de ensaios de caracterização, mistura com resíduo e análises dos parâmetros estudados.

4.1.2 Resíduo de pó de mármore

O resíduo proveniente de marmoraria, foi coletado em uma oficina de beneficiamento na cidade de Pau dos Ferros – RN, localizada na Rua Hemetério Gameleira do Rêgo, coordenadas S06°05'44" W38°12'14", observada na Figura 6.

Figura 6 – Oficina de beneficiamento



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Dentro dos processos realizados, no local de coleta, a empresa faz cortes de precisão e polimento em grandes peças de mármore que são transportadas de jazida localizada no estado da Bahia. A Figura 7 ilustra a lama de marmoraria coletada com uso de pá.

Figura 7 – Lama de marmoraria



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Em seguida, cerca de 30 Kg do material coletado foi armazenado no Laboratório de geologia, pavimentação e solos da UFERSA, *campus* Pau dos Ferros, como pode ser observado na Figura 8, para ser preparado para as etapas posteriores da pesquisa.

Figura 8 – Resíduo de mármore coletado



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

As amostras de resíduo passaram pelos mesmos ensaios de caracterização que a amostra de solo, para análises de influência nos parâmetros geotécnicos do solo.

4.1.3 Cimento

O cimento utilizado para a realização das misturas foi o cimento CP V-ARI RS.

De acordo com Neville (2016), o cimento *portland* de alta resistência inicial (CP V-ARI), é composto de, no máximo, 5% de fíler de calcário e o restante da composição formada por clínquer Portland e sulfato de calcário.

Além disso, os cimentos que possuem a classificação “RS” possuem resistência à sulfatos, isto é, cimentos que apresentam expansão menor ou igual a 0,03 %, aos 56 dias de idade, seguindo requisitos da NBR 16697 (2018).

Este cimento possui especificações de resistência mínimas em um, três e sete dias de 14, 24 e 34 MPa, respectivamente. Isto é, atingindo valores mais elevados de resistência, do que os outros tipos de cimento.

4.2 Mistura de solo e resíduo

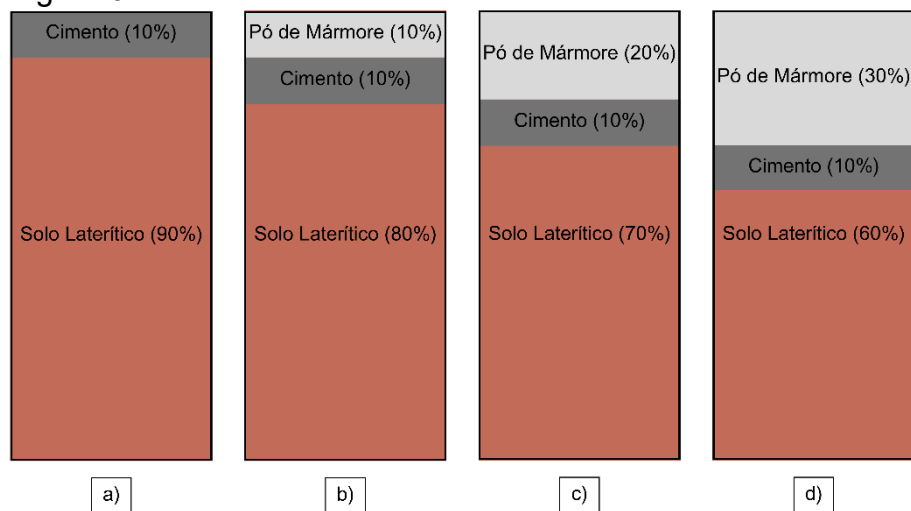
4.2.1 Definição de Misturas

Com base na análise das pesquisas, foi definida a formulação de três teores de mistura de solo e pó de mármore – 10%, 20% e 30% de pó de mármore em substituição do peso do solo – além de uma mistura base de solo estabilizado sem adição de resíduo.

Adicionalmente, incorporou-se 10% de cimento, também substituindo o peso do solo, com o objetivo de haver a cimentação dos grãos e reações pozolânicas, já que o pó de mármore, por si, não possui essa capacidade.

A Figura 9 ilustra a composição dos teores escolhidos, onde a) representa a mistura base de solo laterítico com 10% de cimento, b) define a mistura base com substituição de 10% de pó de mármore. As misturas base com a incorporação de 20% e 30% de pó de mármore, estão ilustradas em c) e d), respectivamente.

Figura 9 – Teores escolhidos



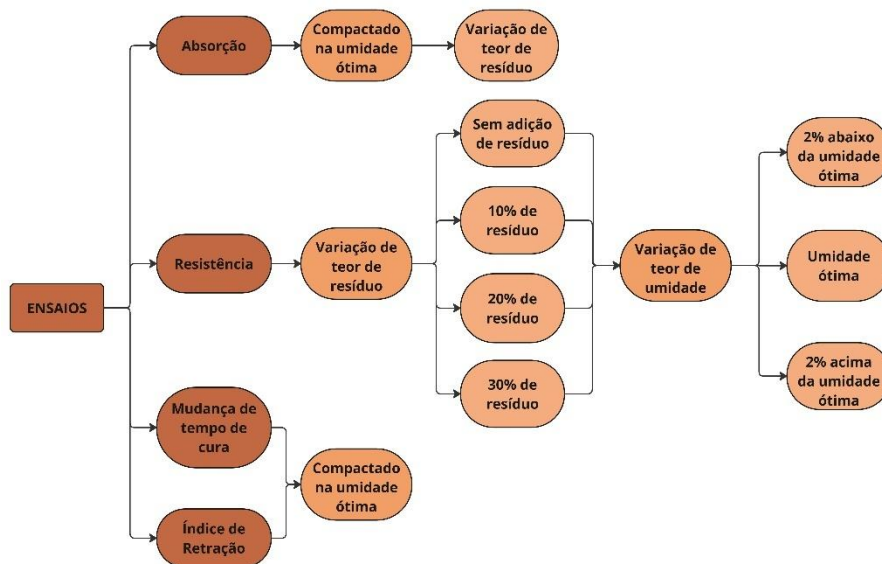
Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Como também houve o objetivo de verificar a influência da mudança de umidade, realizou-se a compactação dos corpos de prova na umidade ótima e em 2% acima e 2% abaixo da umidade ótima. Tendo também a mudança de teor de resíduo nessas variações de umidade.

Para a definição do índice de retração, foram compactados CPs na umidade ótima, com as formulações de solo cimento sem resíduo e do solo

cimento com 30% de pó de mármore, a fim de se analisar as amostras com a maior quantidade de resíduo e sem a substituição na composição. A Figura 10 mostra um fluxograma dos ensaios que foram realizados.

Figura 10 – Fluxograma de ensaios



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Para cada combinação de teor de resíduo e umidade, foram moldados três corpos de prova, permitindo a obtenção de uma média representativa e aumentando a confiabilidade dos resultados.

4.2.2 Preparação de corpos-de-prova

Para a moldagem dos corpos de prova, a mistura foi compactada com os teores de umidade e resíduo estabelecidos, utilizando energia de compactação Proctor, de acordo com a NBR 7182:2024. O processo foi realizado em um molde cilíndrico pequeno, dividindo a amostra em três camadas, cada uma submetida a 21 golpes com o soquete grande.

Após a moldagem, foram submetidos aos ensaios após 7 dias de cura, com secagem ao ar livre, permitindo a hidratação adequada da mistura. Esse método foi escolhido por não dispor de uma câmara úmida, opção ideal por manter a umidade elevada, evitando a perda de água ao longo da hidratação.

Na Figura 11 é possível observar alguns dos corpos de prova moldados em processo de cura.

Figura 11 – Corpos de porva em processo de cura



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Para organizar adequadamente os ensaios, foi adotado um sistema de nomenclatura padronizado. A sigla SC representa o solo cimento, seguida da letra R acompanhada do teor de resíduo incorporado na mistura. Para os ensaios de compressão axial simples, adiciona-se a letra H com o teor de umidade de compactação. Já para os ensaios de absorção, adiciona-se a letra A. No Quadro 1 são descritas as nomenclaturas de cada ensaio.

Para os ensaios de retração e verificação de mudança de tempo de cura, as nomenclaturas permanecem as mesmas dos ensaios de caracterização.

Quadro 1 - Nomenclatura de ensaios

COMPOSIÇÃO	ENSAIO	
	Absorção	Resistência
Solo cimento, -2% de umidade		SC_R0_H-2
Solo cimento, umidade ótima	SC_R0_A	SC_R0_H0
Solo cimento, +2% de umidade		SC_R0_H+2
Solo cimento, 10% de resíduo, -2% de umidade		SC_R10_H-2
Solo cimento, 10% de resíduo, umidade ótima	SC_R10_A	SC_R10_H0
Solo cimento, 10% de resíduo, +2% de umidade		SC_R10_H+2
Solo cimento, 20% de resíduo, -2% de umidade		SC_R20_H-2
Solo cimento, 20% de resíduo, umidade ótima	SC_R20_A	SC_R20_H0
Solo cimento, 20% de resíduo, +2% de umidade		SC_R20_H+2
Solo cimento, 30% de resíduo, -2% de umidade		SC_R30_H-2
Solo cimento, 30% de resíduo, umidade ótima	SC_R30_A	SC_R30_H0
Solo cimento, 30% de resíduo, +2% de umidade		SC_R30_H+2

Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Para os ensaios de caracterização, foram usadas as nomenclaturas descritas no Quadro 2, para as caracterizações do solo cimento e do solo cimento com três teores de resíduo distintos. Esses dados foram usados para a comparação das características do solo em cada situação.

Quadro 2 - Nomenclatura de caracterização

Amostra	Nomenclatura
Solo cimento sem resíduo	SC_R0
Solo cimento + 10% de resíduo	SC_R10
Solo cimento + 20% de resíduo	SC_R20
Solo cimento + 30% de resíduo	SC_R30

Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

4.3 Ensaios de caracterização

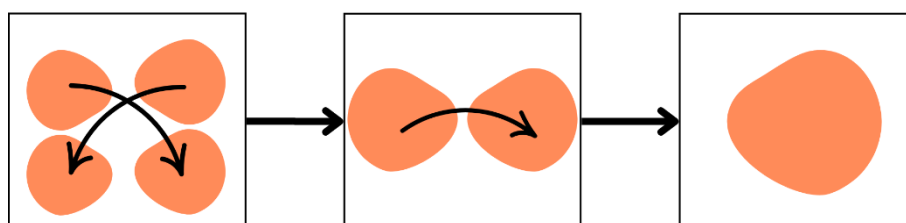
4.3.1 Preparação de amostras para ensaios de caracterização

De acordo com a NBR6457:2024, a preparação de amostras de solo foi feita, inicialmente, secagem do solo em estufa a 110 °C durante 24 horas.

Em seguida, o solo foi destorroado, quebrando os torrões formados pela compactação ou secagem, com o uso de almofariz e mão de grau.

Posteriormente, foi feito o quartejamento para homogeneizar a amostra, dividindo o solo em quatro partes, que são misturadas cruzando suas diagonais, até que se obtenha uma porção uniforme, a Figura 12 mostra um esquema de como esse processo foi realizado.

Figura 12 – Quartejamento de amostra



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Para a preparação de amostra do resíduo de mármore, seguiram-se os mesmos passos. E após essa etapa, foram iniciados os ensaios de caracterização.

4.3.2 Granulometria

A granulometria por método de peneiramento baseia-se na separação das partículas do solo em diferentes faixas granulométricas, utilizando um conjunto de peneiras padronizadas. Cada peneira retém partículas maiores que sua abertura, permitindo que as menores passem para as peneiras com tamanhos inferiores. Esse processo é realizado seguindo uma sequência bem definida de etapas, determinadas pela NBR 7181:2025.

Para o ensaio, inicialmente pesou-se a massa total da amostra seca com uma balança de precisão. Em seguida, colocou-se o solo na sequência de peneiras organizadas por aberturas decrescentes para o peneiramento total. Na Figura 13, é possível observar o conjunto de peneiras utilizado, com as malhas de abertura de 19,00mm, 9,50mm, 6,30mm, 4,75mm, 2,80mm, 2,36mm, 1,18mm, 0,60mm, 0,42mm, 0,30mm, 0,15mm e 0,075mm.

Figura 13 – Conjunto de peneiras



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

A mistura foi agitada manualmente por aproximadamente 10 minutos, de modo que as partículas fiquem retidas nas peneiras correspondentes aos seus tamanhos.

Após o peneiramento, pesou-se a amostra retida em cada peneira, registrando os valores para determinar o percentual passante do material.

Por fim, pesou-se uma amostra parcial da fração passante na peneira de 2,0 mm e repetiu-se o peneiramento total utilizando o mesmo método.

Com esses valores da porcentagem de solo passante, foi possível plotar a curva granulométrica, onde o eixo vertical representa a porcentagem passante do material e o eixo horizontal, as aberturas das peneiras, em milímetros.

A partir da curva granulométrica, obtêm-se os diâmetros do material, D₁₀, D₃₀ e D₆₀, permitindo calcular o coeficiente de não uniformidade e o coeficiente de curvatura, e com eles, é possível a classificação do solo através dos sistemas de classificação ABNT, SUCS e HRB, usando as normas NBR 6502:2022, ASTM-D2487 e AASHTO M 145, respectivamente.

4.3.3 Caracterização das misturas

As amostras foram submetidas a quatro métodos de caracterização. O primeiro consistiu na análise da curva granulométrica, por meio da qual foram

determinados o coeficiente de não uniformidade (CNU) e o coeficiente de curvatura (CC), calculados a partir dos diâmetros D₁₀, D₃₀ e D₆₀, que correspondem à porcentagem de solo passante em 10, 30 e 60%, respectivamente.

Esses parâmetros permitem avaliar o tipo de distribuição granulométrica do solo, classificando a curva como suave, descontínua ou muito uniforme na parte central, utilizando a Equação 1.

Equação 1 - Cálculo do CC

$$CC = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Fonte: Pinto (2006)

O valor do CNU indica o grau de uniformidade da amostra, podendo ser classificado como solo muito uniforme, de uniformidade média ou desuniforme, utilizando a Equação 2.

Equação 2 - Cálculo do CNU

$$CNU = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Fonte: Pinto (2006)

A classificação usando esses parâmetros vai de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3 - Valores de CNU e CC

CNU	UNIFORMIDADE	CC	CURVA
Menor que 5,0	Muito Uniforme	Menor que 1,0	Descontínua
Entre 5,0 e 15,0	Uniformidade Média	Entre 1,0 e 3,0	Suave
Maior que 15,0	Desuniforme	Maior que 3,0	Muito Uniforme na Parte Central

Fonte: Pinto (2006)

Em seguida, foi adotada a norma NBR 6502:2022, que define a classificação dos solos com base na granulometria. Segundo essa norma, o solo é constituído por pedregulhos, areia grossa, areia média, areia fina, silte e argila. Essa distribuição é mostrada no Quadro 4.

Quadro 4 - Composição de solos

Composição de Solos	
Pedregulho	>4,8mm
Areia Grossa	0,6 - 2mm
Areia Média	0,2 - 0,6mm
Areia Fina	0,06 - 0,2mm
Silte e Argila	<0,06mm

Fonte: ABNT (2022)

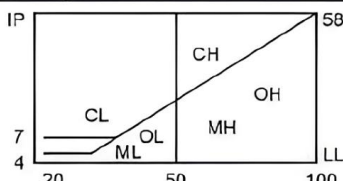
O terceiro método de caracterização adotado foi a classificação das misturas segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), normatizado pela norma ASTM-D2487 de 2017.

Essa classificação baseia-se na porcentagem de material passante pela peneira nº 200 (0,075 mm), nos coeficientes granulométricos (CU e CC), bem como nos limites de Atterberg. A partir desses parâmetros, é possível identificar o tipo e o grupo de solo predominante em cada mistura.

A Figura 14 apresenta o esquema de classificação utilizado SUCS.

Figura 14 – Esquema de classificação SUCS

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3	
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3	
		% P #200 > 12	GC 	
			GM	
		5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
	S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3	
		SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3		
% P #200 > 12		SC 		
		SM		
	5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.		

% P #200 > 50	C	CL	
		CH	
	M	ML	
		MH	
	O	OL	
		OH	

Fonte: Pinto (2006)

O último sistema de classificação adotado foi o sistema rodoviário (HRB), normatizado pela AASHTO M 145-91 de 1991 que considera a porcentagem de material passante nas peneiras de 2 mm, 0,425 mm e 0,075 mm, além dos valores de limite de liquidez e índice de plasticidade do solo, para definir a classe do material. A Figura 15 ilustra o esquema de classificação, utilizando esse sistema.

Figura 15 – Esquema de classificação HRB

% P #200 < 35		% P #10 2,0 mm	% P #40 0,42 mm	% P #200 0,075 mm	IP
	A-1a	< 50	< 30	< 15	< 6
	A-1b		< 50	< 25	< 6
	A-3		> 50	< 10	NP
	A-2	IP A 2-4 A 2-5 A 2-6 A 2-7 10 40	 LL		
% P #200 > 35	A-4	IP A 6 A 7-5 A 4 A 5 10 40	 LL		
	A-5				
	A-6				
	A-7-5				
	A-7-6				

Fonte: Pinto (2006)

4.3.4 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg são utilizados para caracterizar e classificar a consistência dos solos, especialmente os solos finos, entre os estados líquido e sólido. O método de análise segue as diretrizes estabelecidas pelas normas NBR 6459:2016 para limite de liquidez (LL) e NBR 7180:2016 para limite de plasticidade (LP).

4.3.4.1 Limite de Liquidez

Inicialmente, com uma amostra de solo passante na peneira de 0,425mm, adicionou-se uma quantidade de água próxima à umidade de limite de plasticidade e preencheu-se a concha do aparelho de Casagrande, de modo que a espessura do material seja de aproximadamente 10 mm. Em seguida, utiliza-se um cinzel para abrir uma ranhura no centro da concha.

O aparelho foi então acionado, aplicando sucessivos golpes na concha, que são contados. A Figura 16 ilustra o aparelho Casagrande, usado para a realização dos ensaios de LL e o cinzel utilizado.

Figura 16 – Aparelho de Casagrande



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

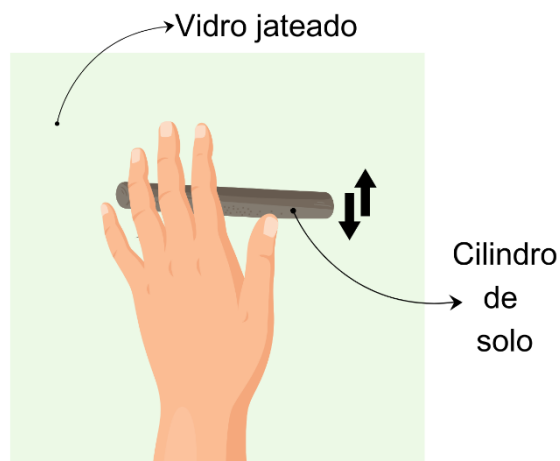
A umidade da amostra foi aferida pela porção que se juntou. Foram coletados seis pontos de cada amostra dos ensaios, com diferentes teores de umidade e entre 15 e 35 golpes.

A partir dos pontos de umidade e número de golpes coletados em ensaio, é realizada uma regressão da equação a fim de obter-se onde a umidade para o limite de liquidez é definida como o valor correspondente a 25 golpes.

4.3.4.2 Limite de Plasticidade

Inicialmente, a amostra do ensaio foi peneirada e o material passante da peneira de 0,425mm foi homogeneizado adicionando-se água até que a mistura tenha obtido uma consistência plástica. Em seguida, retirou-se uma porção de 10 g, que foi moldada em forma de bola e rolada sobre uma placa de vidro jateado até formar um cilindro com aproximadamente 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. A Figura 17 demonstra como foi realizado a moldagem do cilindro.

Figura 17 – Moldagem de cilindro de solo



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Esse processo foi repetido 5 vezes. Em cada ensaio foram coletadas e levadas à estufa para determinar a umidade correspondente ao limite de plasticidade da amostra, a partir de uma média desses valores.

4.3.5 Compactação

O ensaio de compactação tem como objetivo determinar a umidade ótima de compactação de solo, fazendo uma relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo. Esse método é normatizado pela NBR 7181:2016.

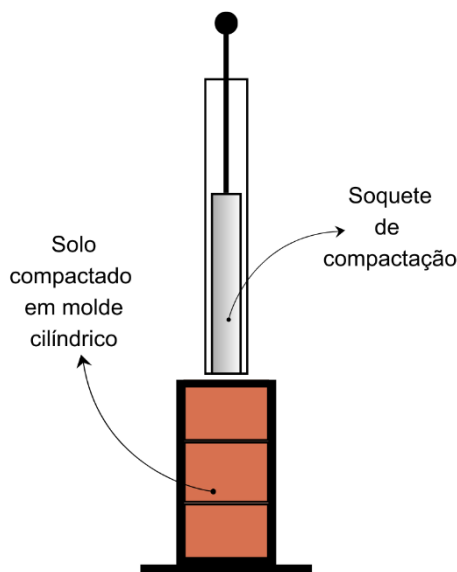
Inicialmente, pesa-se e mede-se o cilindro que servirá como molde para o corpo de prova de compactação, assim como as cápsulas utilizadas para determinar a umidade das amostras.

Para a compactação com reuso de material, utilizou-se sete quilos de amostra de solo, passante na peneira de 4,75 mm, e adicionou-se água para variar o teor de umidade. Em seguida, o solo é incorporado ao molde padronizado até preencher aproximadamente 1/3 de seu volume, e aplicou-se 21 golpes com o soquete pequeno, gerando uma energia intermediária de compactação.

Na etapa seguinte, adicionou-se solo no cilindro formando uma camada de mesma espessura da primeira, realizando a escarificação entre elas. O mesmo processo é realizado para a compactação da última camada. Por fim, pesou-se o cilindro com o solo; o solo úmido foi então retornado à bandeja,

destorreado e complementado com água suficiente para a próxima unidade de compactação desejada. Após a compactação da segunda camada, foi coletando a unidade da amostra compactada, retirada do material restante na bandeja. A Figura 18 mostra o conjunto do ensaio, evidenciando as camadas de solo compactado.

Figura 18 – Compactação de solo



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Esse procedimento de variação de umidade e compactação foi repetido, seis vezes, permitindo a construção da curva de compactação.

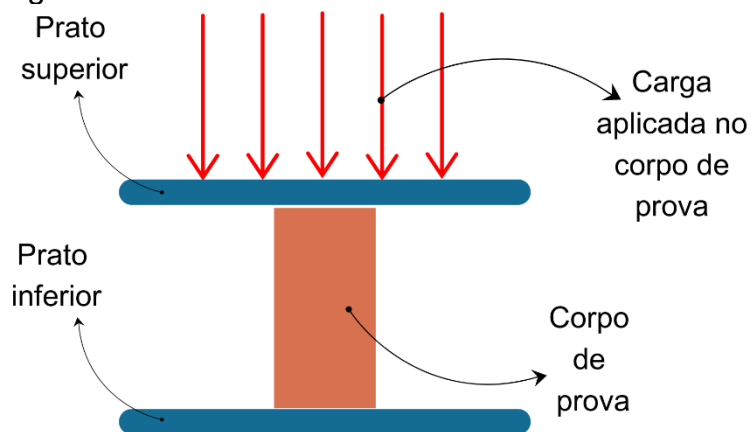
4.4 Ensaios de desempenho nas amostras

4.4.1 Resistência à compressão simples

O ensaio de compressão axial simples das amostras segue a ABNT NBR 5739:2018, que estabelece o método de ensaio para corpos de prova de concreto.

Nesse processo, inicialmente, mediu-se o diâmetro das amostras para calcular a área da seção transversal. Em seguida, a amostra foi posicionada de forma centralizada entre os dois pratos da máquina, e por fim, foi aplicado um carregamento contínuo no corpo de prova até a sua ruptura. A Figura 19 ilustra o processo de aplicação de cargas no corpo de prova.

Figura 19 – Ensaio de Resistência



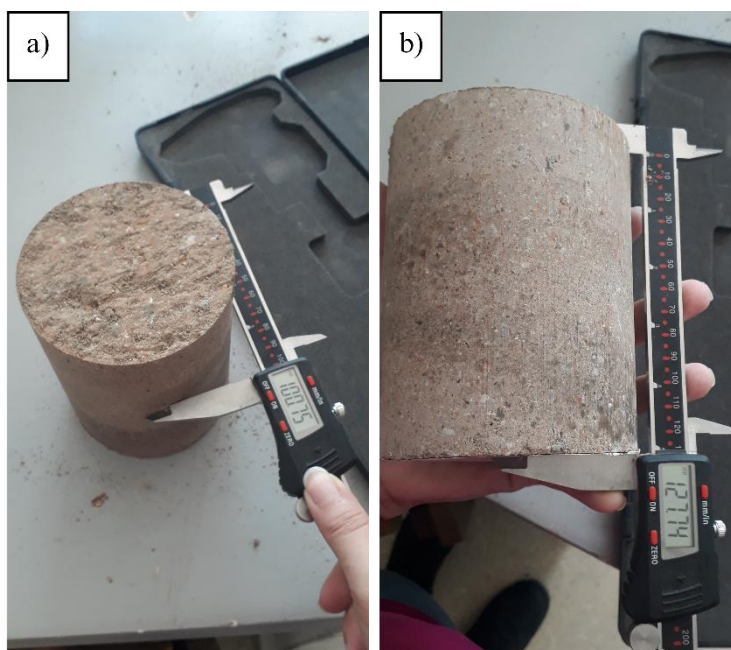
Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Por fim, a resistência à compressão foi determinada dividindo a força máxima alcançada pela área transversal do corpo de prova.

4.4.2 Retração volumétrica

Para a determinação da retração volumétrica dos corpos de prova, foram realizadas medições de diâmetro e altura, a partir das quais se calculou o volume de cada amostra. A Figura 20 ilustra as medições dos corpos de prova, sendo a) a obtenção do diâmetro e b) a obtenção da altura.

Figura 20 – Obtenção de medidas dos corpos de prova

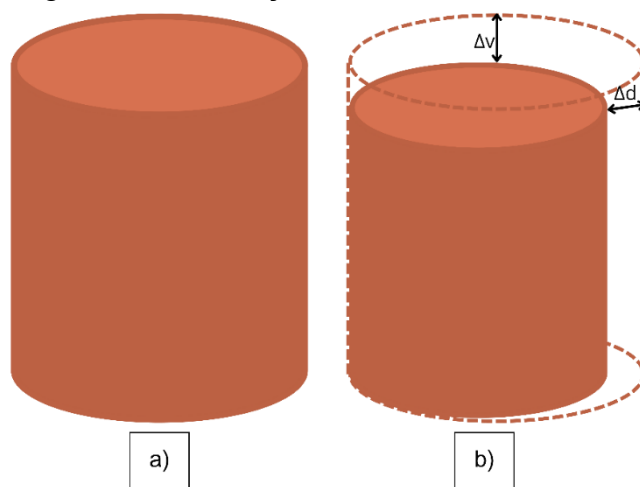


Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Essas medições foram repetidas nas mesmas idades, com o objetivo de comparar os valores ao longo do tempo. As idades avaliadas foram: após a moldagem, 24 horas após a moldagem, e aos 7, 14, 21 e 28 dias. Esse acompanhamento permitiu identificar eventuais variações volumétricas dos corpos de prova ao longo do período analisado.

A Figura 21 ilustra esse ensaio, onde o Δv representa a diferença da altura, enquanto o Δd , a diferença do diâmetro dos corpos de prova.

Figura 21 – Retração de CP



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Com essas diferenças é possível se calcular a variação volumétrica dos corpos de prova e fazer a comparação entre as formulações.

4.4.3 Modificação de tempo de cura

Para a análise da influência do tempo de cura na resistência dos corpos de prova, as amostras foram moldadas e submetidas a rompimentos em diferentes idades: 7, 14, 21 e 28 dias após a moldagem. As misturas selecionadas para esse ensaio foram o solo-cimento sem adição de resíduo e o solo-cimento com 30% de resíduo, permitindo uma comparação direta entre a formulação de referência e a que apresenta o maior teor de resíduo incorporado.

Após o tempo de cura estimado, os CPs foram rompidos através de compressão axial simples, no intuito de avaliar o comportamento mecânico das extremidades do intervalo de adição de resíduo, podendo ser possível observar os efeitos do pó de mármore ao longo do tempo de cura.

4.4.4 Absorção de água

Para a absorção de água, é utilizada a norma NBR 9779:2012, que define o ensaio de absorção por capilaridade de corpos de prova.

Após a moldagem e o período de cura dos corpos de prova, cada um foi pesado, medido, e marcado uma altura de 5 milímetros a partir da base, limite até onde a água deveria atingir durante o ensaio.

Em um recipiente, foi colocada uma base para manter os corpos de prova elevados, e adicionou-se água até atingir os 5 mm previamente marcados. Os corpos de prova foram então posicionados verticalmente sobre essa base, com a face inferior em contato com a água e o nível da água, mantendo-se constante por todo o período de ensaio.

Foram, então, realizadas pesagens dos corpos de provas nos seguintes intervalos: 3 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas e 72 horas após o início do contato com a água. Ao final das 72 horas, os corpos de prova foram rompidos diametralmente para verificar a altura efetiva de saturação alcançada internamente, permitindo uma análise visual da ascensão capilar no material.

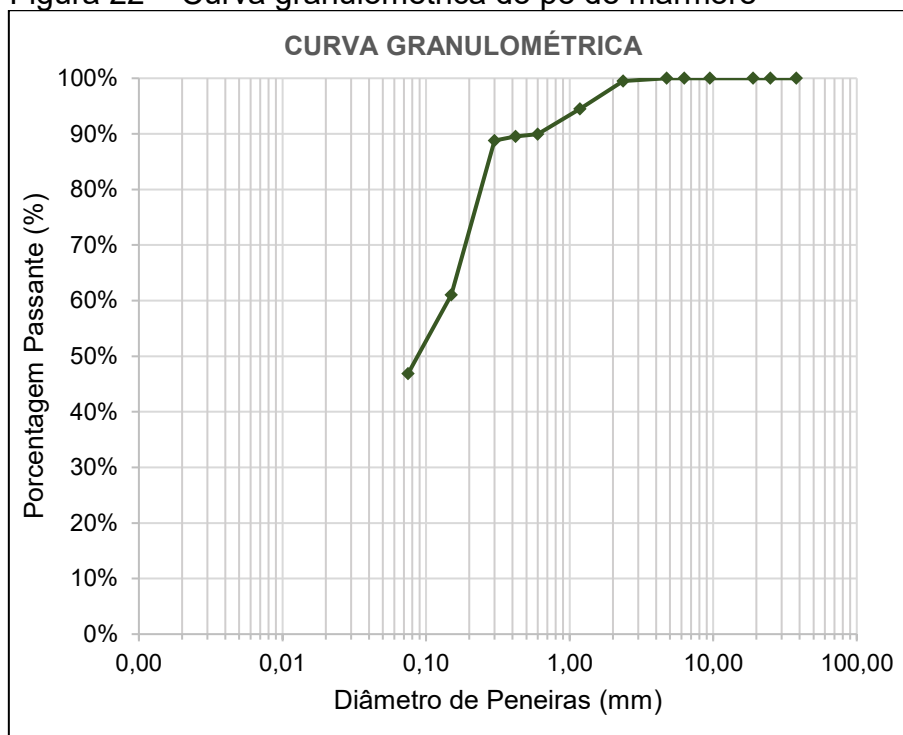
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização

5.1.1 Granulometria

Na Figura 22 está representada a curva granulométrica para o resíduo de pó de mármore, foi possível verificar um elevado teor de finos passantes na peneira de malha 200 (0,075mm), de aproximadamente 46% do material.

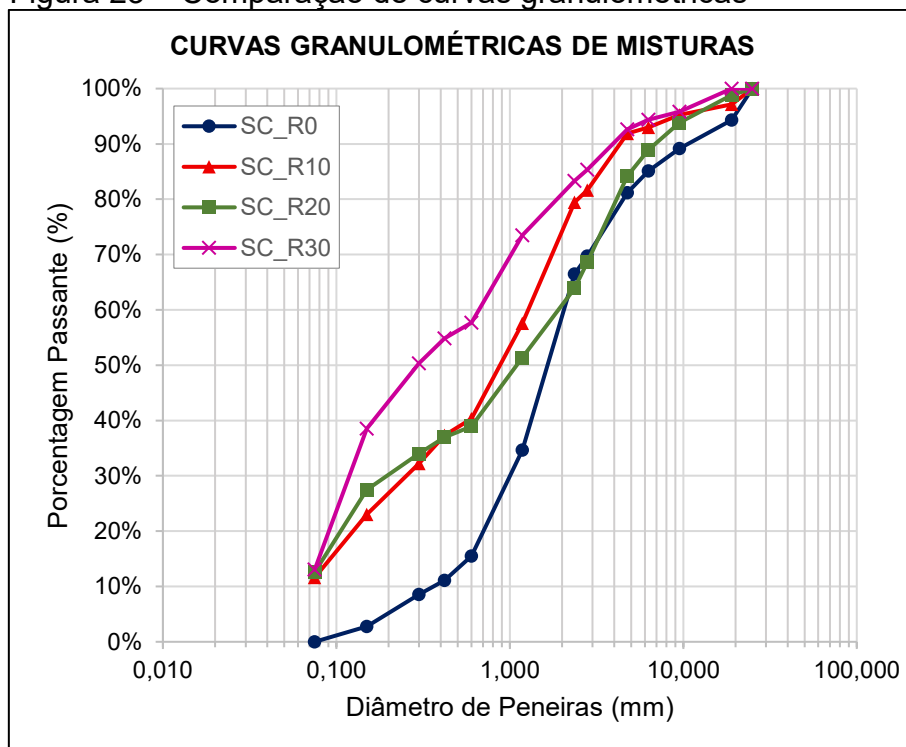
Figura 22 – Curva granulométrica do pó de mármore



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Os resultados do ensaio de granulometria das misturas de solo cimento e resíduo indicaram diferenças significativas entre os corpos de prova com e sem a adição do pó de mármore, visto na Figura 23.

Figura 23 – Comparação de curvas granulométricas



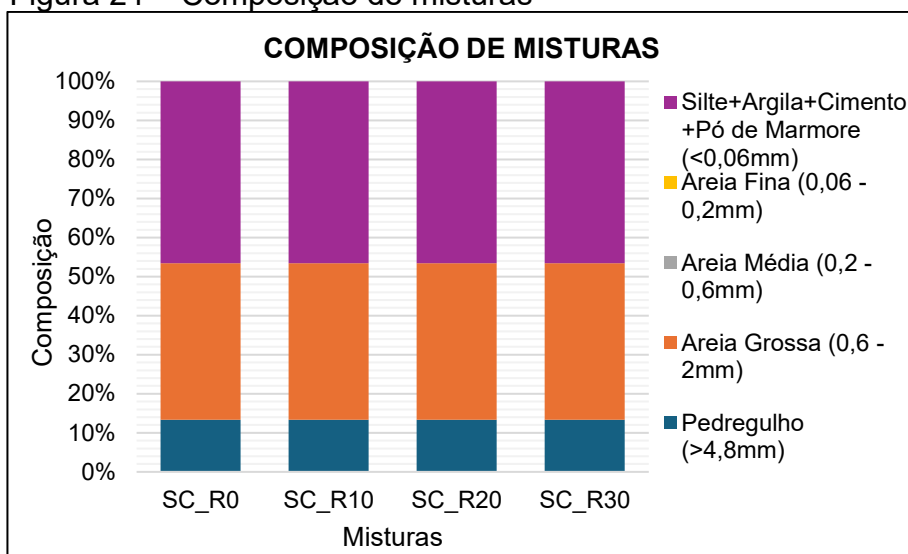
Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

No SC_R0, a curva granulométrica apresentou uma curva suave e contínua, com distribuição muito uniforme dos grãos.

O diâmetro efetivo (D10) da mistura foi de 0,36 mm, enquanto seu D30 e D60 foram 1,00 e 2,05, respectivamente, podendo ser calculados o coeficiente de não uniformidade (CNU) e coeficiente de curvatura (CC) do solo, resultando em 5,56 e 1,35, respectivamente, e sendo classificado como uma mistura com uniformidade média dos grãos e possuindo uma curva granulométrica suave.

Por meio da curva foi possível obter a composição do solo, utilizando a NBR 6502:2022, visto na Figura 24. A mistura de solo cimento é composta de sua maioria de argila e/ou silte, e frações de areia grossa e pedregulho.

Figura 24 – Composição de misturas



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

De acordo com o método de classificação SUCS, a mistura SC_R0 foi considerada SP (areia mal graduada). E de acordo com a caracterização HRB, a mistura SC_R0 pode ser classificada como A-1-a (fragmentos de rocha, pedregulho e areia).

Com a adição de 10% de resíduo, há um aumento na fração fina do solo, refletindo o aumento na quantidade de material passante na peneira de 0,075mm, como observado na Figura 23.

Devido ao aumento de material fino na mistura, o diâmetro D10 tornou-se constituído majoritariamente de frações dos materiais de menor tamanho, argila, silte, cimento e pó de mármore. O D30 e D60 foram, respectivamente, 0,25 e 1,27.

Quando realizada a caracterização através da ABNT, observou-se que essa mistura possuía a mesma composição da mistura SC_R0, conforme visualizado na Figura 24.

Como não foi possível calcular o CNU e CC, devido a falta do D10, também não é possível realizar a caracterização pelo método SUCS. Pelo método HRB, a mistura pode ser classificada como A-2-4 (pedregulho siltoso ou argiloso com areia).

No SC_R20, a curva granulométrica permaneceu com sua forma descontínua, e com uma distribuição de grãos uniforme, também sem apresentar

D10. Deu D30 é de 0,20 e o D60 é de 1,90, não sendo possível o cálculo de CNU e CC.

A caracterização pelo método da ABNT, resultou em uma mistura semelhante à SC_R0 e SC_R10, sendo considerada, também, uma mistura de pó de mármore, cimento, argila e silte, em sua predominância, e frações de areia grossa, como visto na Figura 24. De acordo com o método HRB, a mistura pode ser classificada como A-2-4 (pedregulho siltoso ou argiloso com areia).

Na curva granulométrica da mistura SC_R30, observa-se uma ligeira diferença em relação às demais formulações, possivelmente decorrente de variações nas frações do solo, mesmo após a realização do quarteamento. Ainda assim, a mistura não apresenta o valor de D10, o que impossibilita o cálculo do CC e do CNU. Essa ausência pode ser atribuída ao fato de que, com o aumento do teor de resíduo, menores quantidades de solo passaram a compor a mistura.

A composição da mistura, de acordo com a ABNT, segue sendo similar às outras misturas com a adição de resíduo, evidenciando a necessidade da realização de sedimentação para uma efetiva caracterização da mistura. A composição completa pode ser consultada na Figura 24.

No método de classificação HRB, a mistura SC_R30 também é classificada como A-2-4 (pedregulho siltoso ou argiloso com areia).

Com a adição de resíduo, as curvas granulométricas se deslocam cada vez mais para a esquerda, evidenciando que há um aumento nas partículas finas e levando a comprovar que a composição das misturas passa a ser composta por material mais fino, podendo influenciar em propriedades como resistência, absorção de água, densidade e plasticidade das misturas.

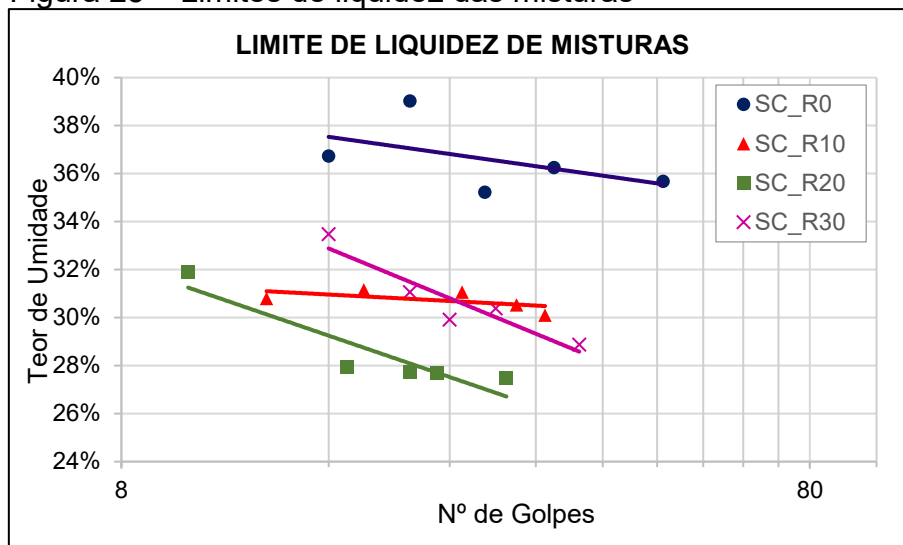
5.1.2 Índices de plasticidade

Quando realizado os ensaios de plasticidade do pó de mármore, pôde-se afirmar que este é um material tem característica plástica, mas que necessita de pouca variação de umidade para atingir os seus limites de plasticidade, uma vez que o LL resultou em 27%, o LP em 25% e, conseqüentemente, o IP resultou em 2% de umidade.

A adição de resíduo também influencia nos índices de plasticidades das misturas, que são modificados de acordo com a incorporação de material fino.

A Figura 25 ilustra os gráficos de limites de liquidez das misturas.

Figura 25 – Limites de liquidez das misturas



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

No solo cimento sem adição de resíduo, o limite de plasticidade encontrado foi de 32% e um limite de liquidez de 37%, gerando um índice de plasticidade de 5%. Com a adição de 10% de resíduo, o LP foi de 31% e o limite de liquidez resultou em não plástico, e consequentemente, resultou na não plasticidade da mistura.

A mistura SC_R20 apresentou o limite de plasticidade em 27% e resultou em não plástico, seguindo o comportamento de plasticidade de SC_R10. E no SC_R30, o limite de plasticidade foi de 29%, enquanto o limite de liquidez resultou em 33%, fazendo com que o índice de plasticidade se tornasse 4%.

O Quadro 5 representa todas as informações de limites de plasticidade das misturas, no intuito de ser realizada uma comparação entre elas.

Quadro 5 - Limites de Plasticidade de misturas

Amostra	LL	LP	IP
SC_R0	37%	32%	5%
SC_R10	31%	NP	NP
SC_R20	27%	NP	NP
SC_R30	31%	29%	2%

Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

De forma comparativa, pôde-se perceber que quando adicionado 10% e 20% do pó de mármore no solo cimento, o limite de liquidez decaiu, tornando a

mistura não plástica evidenciando a interferência da adição de material fino e de baixa plasticidade na mistura.

Por outro lado, ao se adicionar 30% de resíduo, a mistura voltou a apresentar comportamento plástico. Apesar de que os resultados não mostrarem uma tendência clara na alteração de plasticidade das misturas com o aumento de resíduo, quando incorporado ao solo e ao cimento, esse material interage quimicamente, evidenciando propriedades que contribuem para o retorno da plasticidade da mistura, mesmo após reduções observadas em teores intermediários de resíduo, como disposto por Fathonah *et al.* (2023).

De acordo com Jassim *et al.* (2022), o fato do pó de mármore possuir uma grande quantidade de óxido de cal (CaO), ele pode reagir com a água da mistura e formar Ca(OH)_2 , que possui natureza alcalina, e conseguem acelerar o processo de ligação entre as partículas, reduzindo a tendência de deformação do solo. Isso quer dizer que quanto maior o teor de pó de mármore, menor será o índice de plasticidade na mistura, uma vez que as partículas começam a permanecer cada vez mais agregadas entre si.

5.1.3 Compactação

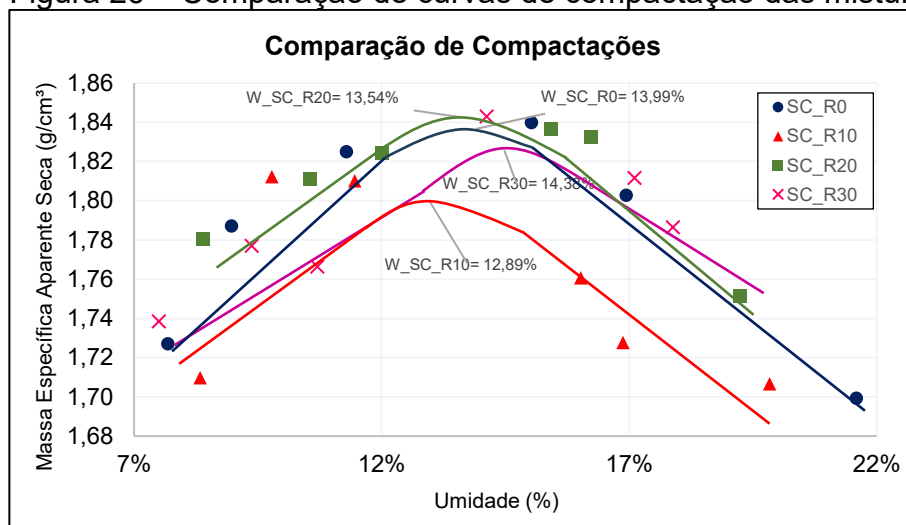
Após a compactação das misturas, foi possível fazer a comparação entre elas e observar o comportamento resultante da mudança do teor de resíduo.

A umidade ótima da mistura base (SC_R0) encontrada foi de 13,99% e sua massa específica aparente seca máxima foi de $1,84 \text{ g/cm}^3$. Na mistura SC_R10, a umidade ótima obtida foi de 12,89% e a massa específica aparente seca foi de $1,794 \text{ g/cm}^3$.

Já nas misturas SC_R20 e SC_R30, a umidade ótima e massa específica aparente seca foram 13,54% e $1,840 \text{ g/cm}^3$ para a primeira mistura e 14,38% e $1,821 \text{ g/cm}^3$ para a segunda, respectivamente.

A Figura 26, ilustra as curvas de compactação obtidas nos ensaios.

Figura 26 – Comparação de curvas de compactação das misturas



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Com base nos resultados do ensaio de compactação, observa-se que a adição de 10% de resíduo ao solo-cimento provocou uma redução na umidade ótima. No entanto, ao se aumentar o teor para 20% e 30%, a umidade ótima passou a crescer novamente, indicando que o aumento do resíduo exige maior teor de água para atingir o grau de compactação ideal.

Os resultados obtidos, estão de acordo com Pinto (2006) que diz que para solos mais finos há um aumento da umidade ótima, uma vez que nesses tipos de solo há uma maior ascensão capilar e maior retenção de água entre as partículas.

Quanto à massa específica aparente seca, houve uma queda significativa na amostra SC_R10, mas nas outras misturas as variações entre as formulações foram pouco significativas, o que sugere que a adição do pó de mármore não exerce influência expressiva sobre a densidade do solo compactado quando incorporado acima de 10%.

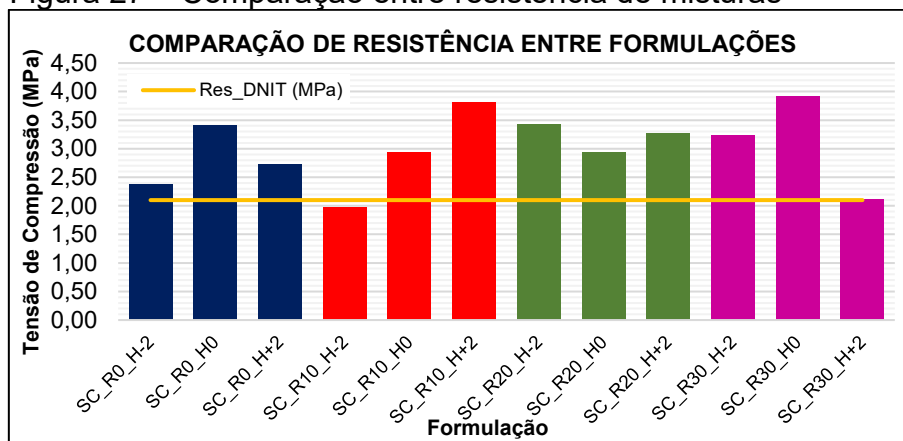
Os experimentos de Jassim *et al.* (2022), Sufian *et al.* (2024) e Fathonah *et al.* (2023), em substituições a partir de 3% de pó de mármore, a massa específica aparente seca começa a decair e em seguida, começa a apresentar massas específicas relativamente estáveis após 9% de pó de mármore, mas em processo de diminuição. Esses estudos também apresentam que a porosidade das misturas aumenta, o que justifica a diminuição da massa específica aparente seca, com o aumento de resíduo.

5.2 Desempenho de misturas

5.2.1 Resistência à Compressão Simples

A Figura 27 ilustra os níveis de tensão alcançados nas quatro misturas e suas mudanças de umidade de compactação.

Figura 27 – Comparação entre resistência de misturas



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Ao comparar os resultados de resistência à compressão simples das misturas compactadas com 2% abaixo da umidade ótima, observou-se que o SC_R0 atingiu uma tensão de 2,38 MPa. O SC_R10 resultou em uma queda de resistência, com a amostra apresentando 1,96 MPa. Em contrapartida, a mistura SC_R20 obteve o maior valor entre as formulações, com 3,43 MPa. Já O SC_R30 apresentou leve redução em relação à anterior, alcançando 3,23 MPa.

Observou-se que não há uma relação linear entre o teor de resíduo de pó de mármore adicionado às misturas e a resistência à compressão simples. Onde a mistura SC_R10 apresentou uma menor resistência em comparação à mistura SC_R0. No entanto, no SC_R20, houve um ganho de 1,47MPa na resistência, quando comparado ao SC_R10, indicando que essa proporção favorece reações que melhoram a coesão da matriz solo cimento. Ao se alcançar 30%, observou-se uma leve redução, o que pode estar associado ao excesso de finos interferindo na compactação ideal ou no equilíbrio das reações químicas. Essa análise pode sugerir que há um ponto ótimo de incorporação de resíduo, na umidade de 2% abaixo da ótima, que maximiza a resistência mecânica do material.

Ao analisar os resultados das formulações compactadas na umidade ótima, observa-se que o SC_R30 obteve o melhor desempenho, atingindo 3,92 MPa. Em contrapartida, as misturas SC_R10 e SC_R20 apresentaram valores semelhantes, ambos com resistência de 2,93 MPa, representando uma redução em relação à SC_R0, que alcançou 3,41 MPa.

Esses resultados indicam que, enquanto teores de 10 e 20% de pó de mármore não melhoraram a resistência do solo estabilizado, o SC_R30, a mistura de uma estrutura mais coesa e resistente. O comportamento de aumento de resistência com o aumento de teor de resíduo está de acordo com as análises de Umar e Lin (2024), Jassim et al. (2022) e Fathonah *et al.* (2023), em que o aumento de resistência acontece de acordo com o aumento de teor de resíduo.

Apesar de que suas amostras em 10 e 20% de resíduo estejam em valores de comportamento distintos das pesquisas, pode ser que em valores intermediários de resíduo, as reações entre pó de mármore tenham se intensificado, uma vez que as proporções entre eles são muito similares na mistura.

De acordo com Sufian *et al.* (2024) o aumento de porosidade diminui a resistência das misturas, os autores justificam pelo aumento de pó de mármore, mas pode ser que haja também a influência do cimento na mistura, principalmente em formulações onde há quantidades semelhantes dos materiais.

Na comparação das resistências das formulações compactadas com 2% acima da umidade ótima, a maior resistência foi registrada na mistura SC_R10, que atingiu 3,81 MPa, superando o SC_R0, que apresentou resistência de 2,72 MPa. A formulação SC_R20 obteve 3,27 MPa, enquanto o SC_R30 apresentou a menor resistência, com 2,12 MPa.

Esses dados sugerem que quando compactado com umidade acima da ótima, as reações entre pó de mármore e cimento são evidenciadas e as resistências refletem o comportamento das análises de Umar e Lin (2024), onde há o aumento de resistência na adição de resíduo e em seguida, o decaimento.

De acordo com a norma DNIT 143/2022, o solo estabilizado com cimento deve atingir uma resistência mínima de 2,1 MPa aos 7 dias de cura para serem aplicados em camadas de base na pavimentação, na Figura 27 é possível perceber a linha base de resistência correspondente à requerida na norma. É

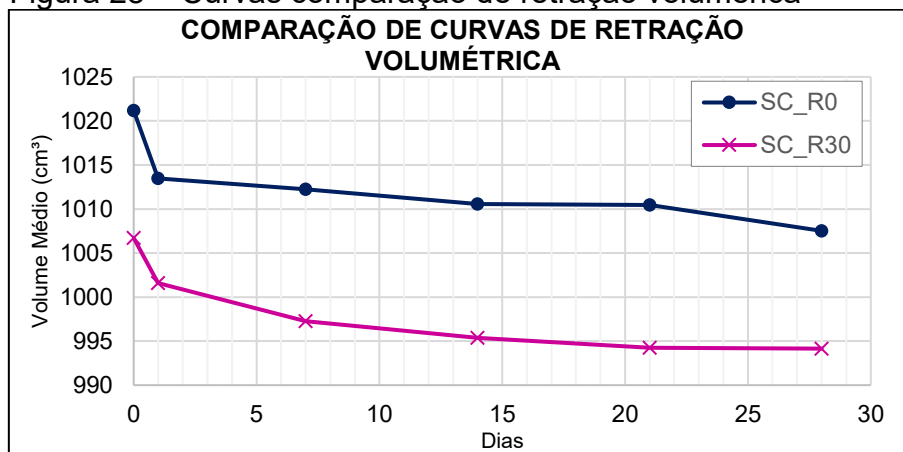
perceptível que todas as misturas possuem grande potencial de usos em camadas mais profundas da pavimentação, no intuito de melhorar a resistência do traçado.

5.2.2 Retração Volumétrica

Foi feita a opção de realizar a verificação de retração das misturas SC_R0 e SC-R30, por possuírem a maior diferença no teor de resíduo nas composições.

Após as medições nos corpos de prova durante o período determinado, foram obtidas as curvas, mostradas na Figura 28.

Figura 28 – Curvas comparação de retração volumétrica



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Observou-se que, nas primeiras 24 horas, a mistura SC_R0 apresentou uma redução volumétrica mais acentuada em comparação à SC_R30. No entanto, entre 24 horas e 21 dias, a variação de volume da SC_R0 foi bastante discreta. A partir dos 21 até os 28 dias, houve uma nova redução, ligeiramente mais pronunciada em relação aos intervalos anteriores.

Para a mistura SC_R30, embora a diminuição volumétrica nas primeiras 24 horas tenha sido inferior à observada na SC_R0, o maior pico de retração ocorreu no intervalo entre 24 horas e 7 dias. Após esse período, a variação de volume da SC_R30 foi mínima, mantendo-se praticamente constante entre os 7 e os 28 dias. Esses resultados indicam que a presença do resíduo influenciou diretamente o comportamento da retração ao longo do tempo, reduzindo as variações tardias e concentrando a maior parte da retração nas fases iniciais de cura.

Ao analisar os valores de volume e suas variações ao longo do tempo, observou-se que a diferença total de volume entre o corpo de prova no momento da moldagem e após 28 dias de cura para as misturas SC_R0 e SC_R30 não foi numericamente elevada, porém, em termos relativos à retração, essa diferença se torna significativa, com um valor de 1,102 cm³ a mais para o SC_R0. No intervalo entre a moldagem e as primeiras 24 horas, a mistura SC_R0 apresentou uma redução volumétrica de 0,76%, enquanto a SC_R30 teve uma retração de 0,51% no mesmo período.

O quadro 6 apresenta as variações de volume calculadas em cada intervalo de tempo, iniciando com a diferença entre a moldagem e 24 horas, seguida das diferenças entre 24 horas e 7 dias, 7 e 14 dias, 14 e 21 dias 21 e 28 dias, e, por fim, entre o dia da moldagem e 28 dias. Esses dados permitem observar com maior precisão o comportamento de retração volumétrica ao longo do tempo para ambas as misturas.

Quadro 6 - Dados de retração de misturas

	SC_R0		SC_R30	
DIA	VOLUME (cm ³)	Diferença (%)	VOLUME	Diferença (%)
0	1021,182	-	1006,711	-
1	1013,464	0,76%	1001,594	0,51%
7	1012,226	0,12%	997,273	0,43%
14	1010,555	0,17%	995,384	0,19%
21	1010,454	0,01%	994,245	0,11%
28	1007,519	0,29%	994,150	0,01%
	-	1,36%	-	1,26%

Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

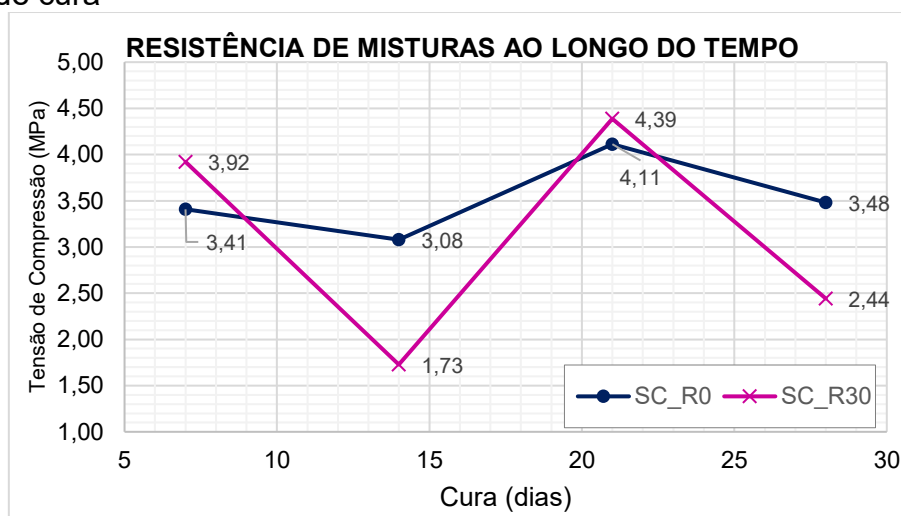
Os dados demonstraram que a adição de 30% de resíduo de mármore contribuiu para um comportamento mais estável da retração volumétrica, concentrando a maior parte da variação nos primeiros dias e apresentando menor alteração nas idades finais, indicando maior uniformidade ao longo do tempo de cura.

5.2.3 Mudança de Tempo de Cura

Assim como nos ensaios de retração, os ensaios de variação no tempo de cura também foram realizados utilizando as amostras de solo cimento sem

adição de resíduo e com 30% de pó de mármore, com o objetivo de avaliar a influência do resíduo no desenvolvimento da resistência mecânica ao longo do tempo. Para isso, foi possível a comparação direta do desempenho entre as duas formulações e a análise da contribuição do resíduo na evolução da resistência à compressão simples. A Figura 29 mostra o resultado dos rompimentos das amostras.

Figura 29 – Comparação de resistência de misturas com a mudança de tempo de cura



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Observou-se que a resistência à compressão simples da mistura SC_R30, aos 7 dias, é ligeiramente superior à da SC_R0. No entanto, aos 14 dias, a resistência do SC_R30 sofre uma queda significativa, sendo superada pela mistura sem adição de resíduo.

A partir dos 21 dias, a resistência do SC_R30 volta a crescer, atingindo o maior valor registrado entre as duas misturas nesse intervalo. Entretanto, aos 28 dias, há um novo declínio na resistência da formulação com 30% de resíduo, fazendo com que o SC_R0 retome o desempenho superior.

Além disso, percebeu-se que a mistura SC_R0 apresentou um comportamento mais linear e estável no desenvolvimento de sua resistência à compressão ao longo do tempo de cura, diferentemente da SC_R30, que revela variações mais acentuadas entre os períodos analisados. A resistência da mistura SC_R0 foi de 3,41 MPa aos 7 dias, mantendo esse valor inalterado aos 28 dias, o que indica consistência no ganho de resistência. Já a mistura SC_R30 iniciou com uma resistência de 3,92 MPa aos 7 dias, mas encerrou com 2,44

MPa aos 28 dias, evidenciando uma queda significativa no desempenho ao final do período de cura.

Nas idades intermediárias, o comportamento também foi contrastante: a resistência da SC_R0 variou suavemente, atingindo 3,08 MPa aos 14 dias e 4,11 MPa aos 21 dias; enquanto a SC_R30 apresentou valores extremos, com 1,73 MPa aos 14 dias e um pico de 4,39 MPa aos 21 dias. Esses dados mostraram que a SC_R30 registrou tanto a maior quanto a menor resistência entre todas as medições. Os resultados sugerem que a adição do pó de mármore pode gerar comportamentos mecânicos menos previsíveis ao longo do tempo de cura.

Como foi utilizado o cimento CPV, cujas características indicaram um ganho acelerado de resistência até os 7 dias de cura, seguido de estabilização, isso pode justificar a pequena variação observada nos valores de resistência, mesmo no solo-cimento sem adição de resíduo.

Os valores de resistência alcançadas, no entanto, não estão de acordo com a pesquisa de Umar e Lin (2024), que obtiveram aumento de resistência de forma linear com adição de 30% de resíduo e a permanência de resistência com o solo sem adição de resíduo, em tempos de 0, 7, 14 e 28 dias de cura. A investigação, no entanto, não utiliza cimento na composição, modificando as características e comportamento das misturas.

5.2.4 Absorção

O ensaio de absorção foi, inicialmente, realizado nos corpos de prova das amostras SC_R0_A e SC_R10_A. A Figura 30 mostra os CPs posicionados antes do ensaio iniciar.

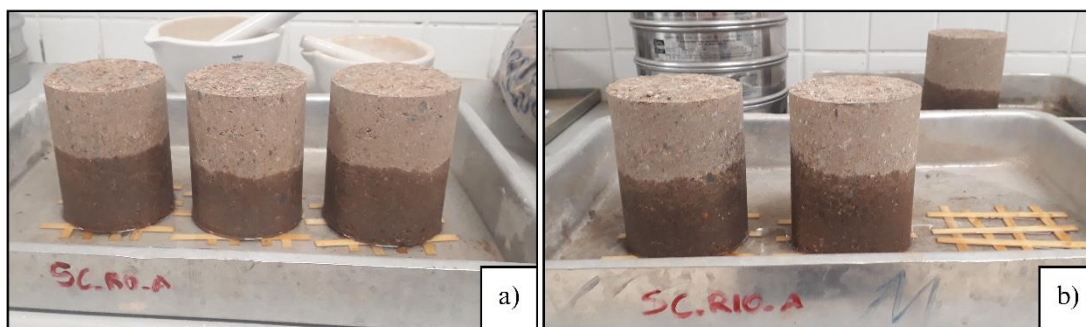
Figura 30 – CPs antes de ensaio de absorção



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Após 4 horas de ensaio, todos os corpos de prova, das duas misturas, encontravam-se com cerca de metade da sua altura saturadas. A Figura 31 comprova isso ilustrando em a) os CPs da mistura SC_R0_A e em b) os CPs da SC_R10_A.

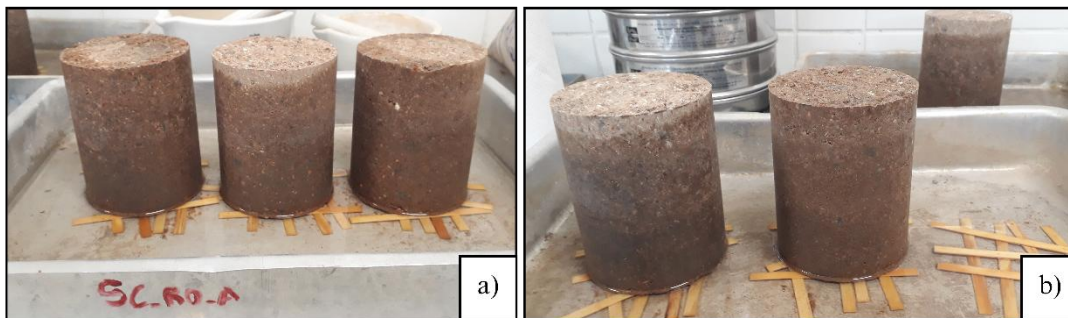
Figura 31 – Corpos de prova com 4 horas de ensaio



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Com 24 horas de ensaio, as amostras estavam praticamente em completa saturação, como mostrado na Figura 32, na imagem a) as amostras da SC_R0_A, e na imagem b) as amostras da SC_R10_A.

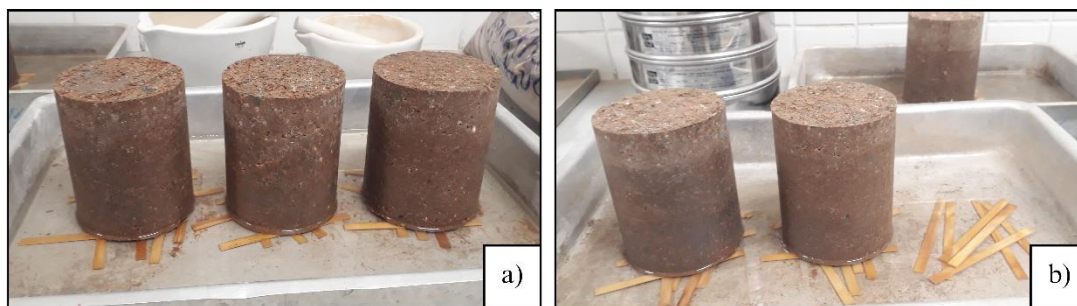
Figura 32 – Corpos de prova à 24 horas de ensaio



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Em 48 horas, foi possível observar que todos os corpos de prova estavam efetivamente saturados. Na Figura 33, em a), os CPs da SC_R0_A e em b) as amostras de SC_R10_A.

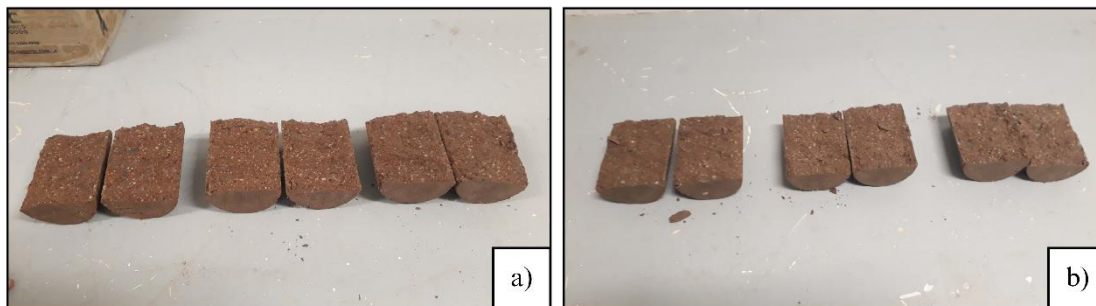
Figura 33 – Corpos de prova com 48 horas de duração de ensaio



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Após 72 horas, os corpos de prova foram rompidos diametralmente, a fim de se realizar a comprovação da saturação dos corpos de prova. Foi possível observar os CPs rompidos e totalmente saturados na Figura 34.

Figura 34 – Corpos de prova rompidos



Fonte: Arquivo Pessoal (2025)

Por fim, os resultados desse ensaio foram considerados inconclusivos, e optou-se por não realizar o ensaio nas amostras das demais misturas, haja visto

que não é possível aferir a diferença na altura da zona de saturação entre as amostras. Além disso, o método de ensaio utilizado foi considerado inviável para corpos de prova constituídos de solo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicaram que o teor de resíduo influencia diretamente propriedades geotécnicas, como os índices de plasticidade, umidade ótima, resistência à compressão e retração volumétrica.

Foi possível observar que teores intermediários de resíduo reduziram a plasticidade das misturas, enquanto o teor de 30% promoveu o retorno do comportamento plástico, possivelmente devido a interações físico-químicas entre o pó de mármore, cimento e água presentes na mistura. Em relação à compactação, a massa específica aparente seca pouco variou entre as formulações, mas a umidade ótima aumentou com o incremento do resíduo.

No que diz respeito à resistência à compressão simples, a mistura SC_R30_H0 apresentou o melhor desempenho. No entanto, a análise do tempo de cura revelou que essa mesma formulação apresentou variações acentuadas de resistência ao longo do tempo. Além disso, a formulação apresentou menor retração volumétrica ao longo dos 28 dias, sugerindo maior estabilidade dimensional.

Os dados obtidos demonstram que a utilização do resíduo de mármore como material estabilizante é tecnicamente viável e apresenta potencial sustentável, contribuindo para o reaproveitamento de resíduos e para o desenvolvimento de tecnologias mais limpas na engenharia, desde que corretamente dosado.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Após a realização e análise da pesquisa, algumas comparações podem ser propostas a fim de suprir lacunas deixadas devido às dificuldades e dúvidas encontradas no decorrer da pesquisa.

- Realizar ensaios de sedimentação e de análises químicas de misturas de solo cimento e teores distintos de resíduos, no intuito de avaliar e comparar o comportamento das frações finas com a influência do pó de mármore.

- Realizar ensaios de absorção utilizando normas de tijolo de solo cimento (ABNT NBR 8492:2012), sendo este um ensaio de absorção mais simplificado e mais adequado para utilização em corpos de prova de solo.

REFERÊNCIAS

AASHTO. Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. **American Association of State Highway Transportation Official. 1-10**, v. 91, n. 2017, p. 1–7, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018** - cimento portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018** - concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:2024** – solos - preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:2016** - solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:2022** - solos e rochas - terminologia. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:2016** - Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:2025** - solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:2016** - solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779:2012** - argamassa e concreto endurecidos — determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ALMEIDA, Bárbara Drumond *et al.* Effect of Sand Addition on Laterite Soil Stabilization. **Materials**, v. 17, n. 24, p. 1–18, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ROCHAS NATURAIS. **Brasil encerra 2024 com alta de 12,7% nas exportações de rochas naturais e reforça liderança global | Centrorochas**. 2025. Disponível em: <https://centrorochas.org.br/brasil-encerra-2024-com-alta-de-127-nas-exportacoes-de-rochas-naturais-e-reforca-lideranca-global/>. Acesso em: 15 maio 2025.

ASTM-D2487. ASTM D2487 Unified Soil Classification System. **ASTM International**, p. 1–10, 2017. Disponível em: <https://blog.ansi.org/2018/03/unified-soil-classification-astm-d2487-17/>.

CAPUTO, Homero P.; CAPUTO, Armando N. **Mecânica dos solos**: teoria e aplicações. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

CARVALHO, Aldo Ribeiro de *et al.* Influência do efeito fíler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. **Ambiente construído**, v. 23, n. 4, p. 217–239, 2023.

CONAMA. **RESOLUÇÃO Nº 307, DE 5 DE JULHO DE 2002**. 2002.

CRUZ, Andréa Cristina Félix da *et al.* Caracterização do Resíduo de Corte de Mármore e Granito de Marmoraria e Análise da Viabilidade de Substituição Parcial do Cimento Portland Para Produção de Pavers. **Revista Univap**, São José dos Campos - SP, p. 91–107, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141** - Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. p. 1–12, 2022.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. Pavimentação – Base de solo-cimento - Especificação de serviço. **143/2022**, p. 10, 2022.

FARIAS, Manoel Leandro Araújo e. **Estudo e classificação de solos lateríticos finos, arenosos e pedregulhosos naturais e melhorados com ligantes hidráulicos para utilização em camadas de pavimentos flexíveis**. 2023. 372 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

FATHONAH, Woelandari *et al.* Sustainable soil use and management: An interdisciplinary and systematic approach. **Results in engineering**, Cilegon, IDN, p. 10, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138961>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha municipal | IBGE**. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 1 ago. 2025.

JASSIM, Najwa Wasif *et al.* Utilization of waste marble powder as sustainable stabilization materials for subgrade layer. **Results in engineering**, v. 14, n. March, 2022.

KURDI, Mo Hamed *et al.* Ecofriendly conversion of marble waste into value-added tiles for green building. **Innovation and technological advances for sustainability - proceedings of the international conference on innovation and technological advances for sustainability, ITAS 2023**, p. 594–604, 2025.

LOPES, Diogo Plachi *et al.* **Sustentabilidade na construção civil**. 1. ed. São Paulo: Editora Arche, 2023.

MÉLO, Virgiane da Silva. **Classificação e estabilização de solos lateríticos do estado da paraíba e do rio grande do norte**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - UFCG, Campina Grande, 2011.

NEVILLE, A M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=dYOPCgAAQBAJ>.

PASSALINI, Pedro Guilherme Sousa; HOLANDA, José Nilson França de. Impactos causados pelo descarte inapropriado de resíduos mármore. **Anais do xv congresso fluminense de iniciação científica e tecnológica / viii congresso fluminense de pós-graduação**, Galoá, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/confict-conpg/confict-conpg-2023/trabalhos/impactos-causados-pelo-descarte-inapropriado-de-residuos-marmore?lang=pt-br>. Acesso em: 16 fev. 2025.

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

RAFI, Mohammad Rafi *et al.* Recycling Marble Waste from Afghan Mining Sites as a Replacement for Cement and Sand. **Buildings**, v. 15, n. 2, 2025.

ROMANINI, Augusto. técnicas de melhoramento de solos. 1.ed. Kindle Direct Publishing (KDP), 2020.

SILVA, J. B. *et al.* Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, v. 51, n. 320, p. 325–330, 2005.

SUFIAN, Muhammad *et al.* An experimental study on the use of waste marble as replacement of aggregates and cement in construction material. **Innovative infrastructure solutions**, v. 9, n. 7, p. 1–17, 2024.

TAN, Yunzhi *et al.* Shrinkage Mechanism of Laterite Modified by Lime and Metakaolin. **Advances in civil engineering**, v. 2020, 2020.

TENÓRIO, Eduardo Antonio Guimarães. **Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal**. 2019. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

UMAR, Ibrahim Haruna; LIN, Hang. Marble Powder as a Soil Stabilizer: An Experimental Investigation of the Geotechnical Properties and Unconfined Compressive Strength Analysis. **Materials**, v. 17, n. 5, 2024.

VILLIBOR, Douglas Fadul *et al.* **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas**. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.