

Influência da Variação do Teor de Resíduo de Mármore e Umidade de Compactação nas Características de Solo Estabilizado com Cimento

Adriana Correia de Moraes 1

Estudante, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, Brasil, moraissadriana1609@gmail.com

José Daniel Jales Silva 2

Docente, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, Brasil, daniel.jales@ufersa.edu.br

RESUMO: O solo laterítico, amplamente presente no território brasileiro, é comumente utilizado em obras de pavimentação, embora em determinadas situações exija melhoramento. Esta pesquisa tem por objetivo avaliar a influência da incorporação do resíduo de mármore em solo laterítico estabilizado com cimento, com foco nas suas propriedades geotécnicas, tais como granulometria e plasticidade, bem como nos parâmetros de compactação e resistência à compressão do solo compactado. Foram elaboradas quatro formulações: uma mistura base composta por solo com 10% de cimento, sem resíduo, e outras três com teores de 10%, 20% e 30% de pó de mármore. Cada formulação foi compactada em três condições distintas: 2% abaixo, na umidade ótima e 2% acima da umidade ótima, permitindo a análise do comportamento do solo frente à variação de umidade. As amostras foram submetidas a ensaios de caracterização geotécnica, e ensaios de desempenho. Os resultados mostraram que a adição do resíduo afetou significativamente parâmetros como plasticidade, umidade ótima e resistência. Em maiores proporções, o pó de mármore demonstrou um comportamento pozolânico, contribuindo para o aumento da resistência e melhoria geral do desempenho do solo-cimento. O estudo reforça o potencial do resíduo como alternativa sustentável no melhoramento de solos.

PALAVRAS-CHAVE: Melhoramento, Solo laterítico, Pó de mármore, Resistência à compressão.

ABSTRACT: Lateritic soil, widely found throughout Brazilian territory, is commonly used in pavement construction, although in certain situations it requires improvement. This research aims to evaluate the influence of incorporating marble residue into lateritic soil stabilized with cement, focusing on its geotechnical properties such as granulometric analysis and plasticity, as well as compaction parameters and unconfined compressive strength of the compacted soil. Four formulations were developed: a base mixture consisting of soil with 10% cement and no residue, and three others containing 10%, 20%, and 30% marble powder. Each formulation was compacted under three different conditions: 2% below, in optimum moisture, and 2% above the optimum moisture content, allowing analysis of soil behavior under varying moisture conditions. The samples were subjected to geotechnical characterization tests and performance tests. The results showed that the addition of the residue significantly affected parameters such as plasticity, optimum moisture content, and strength. At higher contents, the marble powder exhibited pozzolanic behavior, contributing to increased strength and overall improvement in the performance of the soil-cement mixture. The study highlights the potential of marble residue as a sustainable alternative for soil improvement.

KEYWORDS: Improvement, Lateritic Soil, Marble Powder, Compressive Strength.

1 INTRODUÇÃO

O solo é um material essencial na construção civil, além de desempenhar um papel crucial em obras de infraestrutura. Entretanto, há situações em que a melhoria ou estabilização do solo se torna necessária para aumentar o desempenho do material e adequar suas propriedades às exigências de projeto, promovendo melhor compatibilidade entre as características do material e os critérios requeridos à sua aplicação.

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. De acordo com Fathonah et al., (2023), Umar e Lin (2024) e Jassim et al. (2022), a incorporação de pó de mármore em solos de alta



2025

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.

Essa incorporação 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 da influência desses materiais alternativos nas propriedades do solo estabilizado. O processo também abre espaço para a disposição de resíduos passíveis de aplicação em pavimentação, onde caso contrário tais resíduos causariam impacto ambiental.

Os solos lateríticos, formados pelo processo de laterização em regiões intertropicais, representam cerca de 19% do território mundial (Farias, 2023). Ricos em óxidos de ferro e alumínio, além de caulinita, apresentam cores variadas e características como maior retenção de água, estabilidade e coesão, conferindo aspecto cimentado às partículas. No entanto, são sensíveis à variação de umidade, podendo fissurar quando secos ou se tornar moles quando muito úmidos, comprometendo a resistência do solo compactado e ocasionando falhas em obras (Tan et al., 2020). Apesar disso, são amplamente utilizados em bases e sub-bases de pavimentação, embora, em alguns casos, necessitem de estabilização para atender às especificações técnicas.

Essa estabilização é um processo que visa melhorar as propriedades físicas, químicas e mecânicas do solo, contribuindo para redução do índice de vazios, aumento de durabilidade, redução de expansão e índices de plasticidade, além do aumento da resistência e carga de suporte do solo (Mélo, 2011), ela pode ser realizada com o uso de materiais dos quais o solo possa obter melhoria nas suas propriedades, como o cimento e a cal hidratada. Além disso o uso de resíduos como agente para estabilização e melhoria de solo é uma boa escolha quando avaliado as características desses materiais e o impacto ambiental de uma má destinação do resíduo.

Quando observado a produção de resíduo proveniente da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais, Carvalho et al. (2023), Silva et al. (2005) e Associação Brasileira de Rochas Naturais (2025), afirmam que o Brasil é um dos maiores produtores de rochas ornamentais do mundo, com expressivo volume de comercialização e crescimento no faturamento do setor. No entanto, o processo de extração e beneficiamento dessas rochas gera perdas significativas, podendo alcançar até 40% do material original, com até 25% convertido em resíduo. Esse resíduo, muitas vezes descartado sem tratamento adequado, causa impactos ambientais como assoreamento de rios e degradação da paisagem, apesar de ser considerado inerte.

Segundo pesquisa de Carvalho et al. (2023), devido sua função de efeito filer, 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 de cimentação entre partículas, 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.

O processo de obtenção do pó de mármore se dá quando acontece o corte e polimento 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.

Esta pesquisa investiga a incorporação de pó de mármore em solo laterítico estabilizado com cimento, avaliando suas propriedades geotécnicas frente à variação de umidade e teor de resíduo. Estudos anteriores (Fathonah et al., 2023; Jassim et al., 2022; Umar; Lin, 2024) já demonstraram que o resíduo pode reduzir a absorção de água e aumentar a resistência do solo. Além de gerar resultados experimentais sobre um material ainda pouco explorado, o trabalho busca propor um uso sustentável para o resíduo, com potencial aplicação em obras de infraestrutura, reduzindo impactos ambientais e custos na engenharia geotécnica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solo Utilizado

O solo laterítico local, coletado na cidade de Rafael Fernandes – RN, coordenadas S06°12'13,1" W38°13'34,8" apresenta coloração avermelhada, presença de grãos de tamanhos variados e que foi realizada coleta de amostra deformada em jazida superficial sem aparente presença de matéria orgânica. Na Figura 1 é possível a visualização do solo coletado.

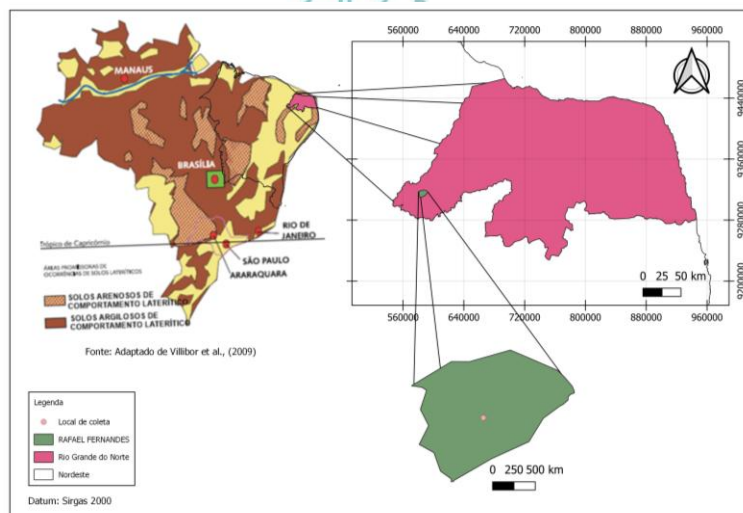


Figura 1. Local de coleta de solo laterítico.

2.2 Pó de mármore

O resíduo de pó de mármore utilizado nesta pesquisa (Figura 2), foi coletado em uma oficina de beneficiamento na cidade de Pau dos Ferros – RN. Este passou por secagem em estufa, para maior controle nos ensaios de laboratório e, então, por caracterização usando os mesmos métodos de caracterização física de solo, como análise granulométrica e limites de plasticidade e liquidez.



Figura 2. Lama de marmoraria.

2.3 Definição de Misturas de Solo e Resíduo

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 CP V-ARI RS, também substituindo o peso do solo, com o objetivo de assegurar que o solo esteja suficientemente estabilizado para que os corpos de prova, compostos pela mistura de solo, cimento e resíduo, suportem a saturação durante os ensaios de absorção.

Com o objetivo de verificar a influência da mudança de umidade, a compactação dos corpos de prova foi realizada na umidade ótima, 2% acima e 2% abaixo da umidade ótima, combinadas com a variação de teor de resíduo em cada uma das umidades de compactação.

Para organizar adequadamente os ensaios, foi adotada uma nomenclatura padronizada. As amostras são identificadas pela sigla “SC”, correspondente a solo-cimento, seguida da letra “R” e da porcentagem de resíduo incorporado. Nos ensaios de resistência, acrescenta-se a letra “H” acompanhada da variação de umidade da

amostra (+2, 0, -2), já nos ensaios de absorção, a nomenclatura inicia-se com a letra “A”. A Tabela 1 ilustra a nomenclatura das amostras e ensaios realizados.

Tabela 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

2.4 Método experimental

A pesquisa foi conduzida por meio de método experimental, com base em normas técnicas da ABNT. Os ensaios de caracterização incluíram análise granulométrica dos grãos mais grossos (NBR 7181:2025), determinação do limite de liquidez (NBR 6459:2016) e do limite de plasticidade (NBR 7180:2016). A compactação foi realizada conforme a NBR 7182:2016.

Para a moldagem dos corpos de prova, cada amostra foi compactada com o teor de umidade e resíduo estabelecido, utilizando energia de compactação Proctor intermediária. Os corpos de prova, após a moldagem, foram submetidos aos ensaios após 7 dias de cura, com secagem ao ar livre, permitindo a hidratação significativa do material nas misturas.

Também foi realizado o ensaio de compressão axial simples, conforme a NBR 5739:2018, com o objetivo de avaliar a resistência mecânica das amostras após 7, 14, 21 e 28 dias após a moldagem do CP. Por fim, para a avaliação da absorção por capilaridade, utilizou-se a NBR 9779:2012.

A Figura 3 mostra um fluxograma de ensaios realizados.

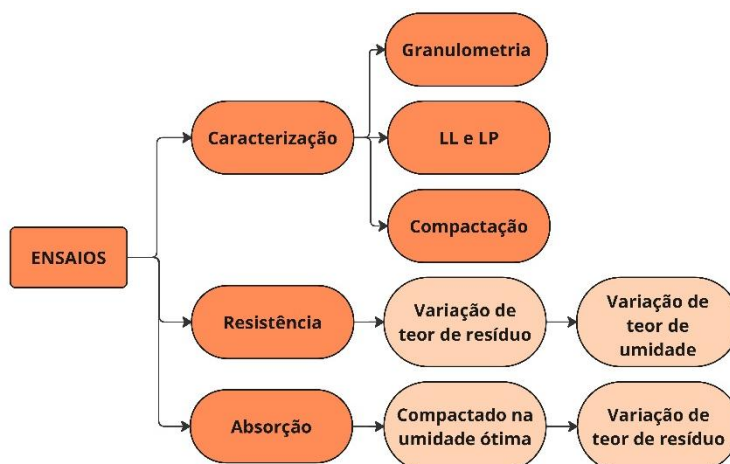


Figura 3. Fluxograma de ensaios.

3 RESULTADOS

Os resultados do ensaio de granulometria indicaram diferenças significativas entre os corpos de prova com e sem a adição do resíduo de marmoraria. No solo-cimento sem resíduo, a curva granulométrica apresentou uma curva suave e contínua, com distribuição bem graduada dos grãos. Seu CNU e CC calculados foram de 5,56 e 1,35, respectivamente. Sendo considerado, então, um solo com uniformidade média e possuindo uma curva suave.

Na mistura SC_R10, é perceptível o aumento do teor de finos no solo, através da sua curva granulométrica, é possível ainda dizer que há uma transição gradativa para uma curva típica de um solo fino. Ao elevar o teor de resíduo para 20% e 30%, a curva manteve o comportamento descontínuo, com a presença de finos passantes na peneira 200 ainda mais acentuada. Ainda assim, mesmo com a incorporação de resíduo, o solo permaneceu com uma distribuição granulométrica bastante uniforme, demonstrando uma uniformidade de grãos considerável. Devido à predominância de finos e à forma das curvas, não foi possível calcular o diâmetro efetivo (D10) nas amostras com resíduo, o que reforça a influência do pó de mármore na modificação da distribuição granulométrica do solo estabilizado. A Figura 4 ilustra as curvas granulométricas das misturas, do solo natural, sem adição de resíduo ou cimento, e do pó de mármore.

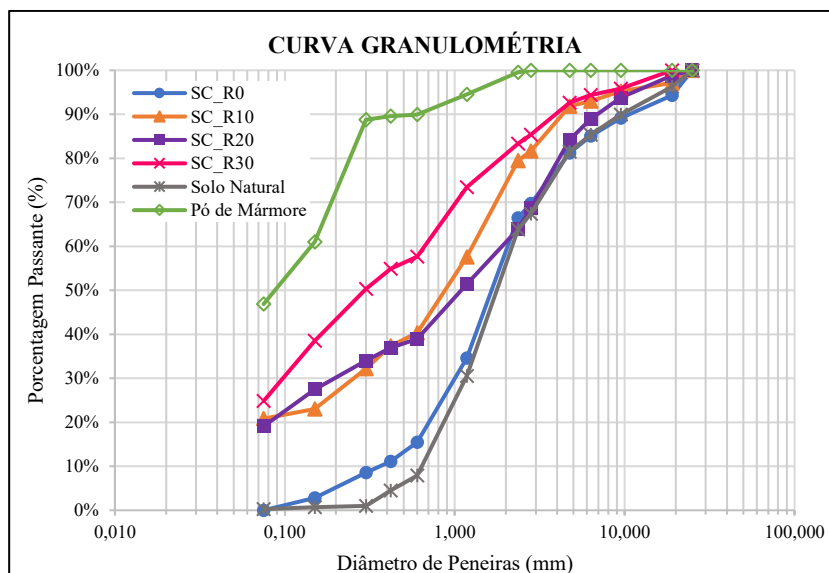




Tabela 2. Dados de índices de plasticidade, umidade ótima e massa específica aparente seca.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Umidade ótima (%)	Massa Específica Aparente Seca (g/cm³)
Pó de Mármore	27	25	2	-	-
SC_R0	37	32	5	13,99	1,838
SC_R10	31	NP	NP	12,89	1,794
SC_R20	27	NP	NP	13,54	1,840
SC_R30	31	29	2	14,38	1,821

Com o ensaio de compactação, foi possível observar que a umidade ótima do solo-cimento sem adição de resíduo foi superada apenas pela mistura com 30% de resíduo, evidenciando que o aumento de resíduo exige que a umidade da mistura seja maior.

Em relação à massa específica aparente seca, os resultados mostraram pouca variação entre as misturas. O maior valor foi registrado na amostra com 20% de resíduo, embora esse valor tenha sido praticamente igual ao do solo-cimento sem adição de resíduo. Com 10% de resíduo, observou-se uma leve queda, seguida de um aumento com 20%, e nova redução na mistura com 30%. Ainda assim, os valores permaneceram bastante próximos entre si, indicando que a variação no teor de resíduo de mármore não provocou alterações significativas na densidade seca dos corpos de prova compactados.

De modo geral, a massa específica aparente seca manteve-se relativamente constante entre as quatro formulações, sugerindo que a incorporação do resíduo, mesmo em diferentes proporções, não comprometeu o nível de compactação alcançado. A Figura 5 mostra as curvas de compactação das misturas.

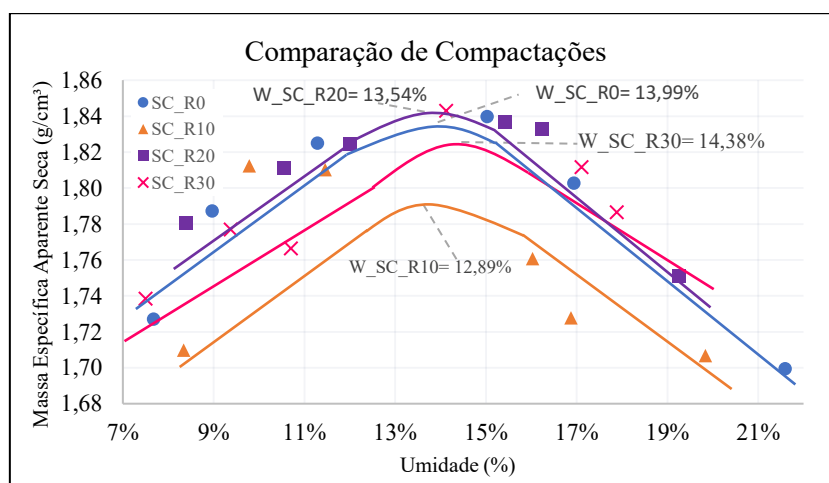


Figura 5. Curvas de compactação das quatro misturas de solo, cimento e resíduo.

Em relação à resistência à compressão simples, na compactação com 2% abaixo da umidade ótima, o SC_R0 apresentou 2,38 MPa, o SC_R10 reduziu para 1,96 MPa, enquanto o SC_R20 alcançou o maior valor, 3,43 MPa, seguido do SC_R30 com 3,23 MPa. Esse comportamento indica ausência de linearidade entre o teor de resíduo e a resistência, sugerindo que 20% pode representar um ponto ótimo de incorporação, já que proporções maiores tendem a reduzir a eficiência devido ao excesso de finos.

Na umidade ótima, o SC_R30 obteve o melhor desempenho com 3,92 MPa, superando 3,41 MPa alcançado pela SC_R0, enquanto SC_R10 e SC_R20 atingiram valores semelhantes de 2,93 MPa, inferiores à mistura base. 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.

Com 2% acima da umidade ótima, o melhor desempenho foi do SC_R10 com 3,81 MPa, seguido pelo SC_R20 que alcançou 3,27 MPa, enquanto o SC_R30 apresentou o menor valor, 2,12 MPa. Essa variação sugere que a umidade exerce papel decisivo no equilíbrio das reações entre solo, cimento e resíduo. A Figura 6 ilustra a comparação entre os resultados dos ensaios de resistência à compressão das amostras.

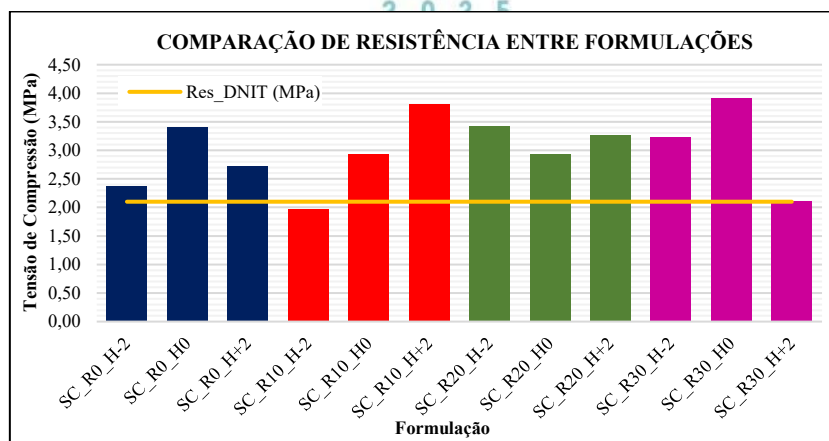


Figura 6. Comparação entre resistências de formulações.

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.

Para o ensaio de absorção, foram inicialmente moldados corpos de prova de solo-cimento sem adição de resíduo e com adição de 30% de resíduo de mármore. O procedimento foi conduzido conforme os critérios estabelecidos na norma NBR 9778:2005. No entanto, após aproximadamente 24 horas de ensaio, observou-se que os corpos de prova já se encontravam completamente saturados.

Apesar disso, o ensaio foi mantido por 72 horas, como previsto, mas ao final desse período confirmou-se a saturação completa das amostras, o que comprometeu a validade dos resultados e indicou a inadequação do método para esse tipo de material. Diante disso, as amostras foram desconsideradas, e o método foi considerado não aplicável para corpos de prova de solo-cimento nessas condições.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos resultados, foi possível observar que a adição de pó de mármore ao solo-cimento influencia significativamente diversas propriedades do material. A curva granulométrica das misturas apresentou maior concentração de partículas finas, devido ao tamanho reduzido dos grãos do resíduo, o que impacta diretamente na plasticidade da mistura. Verificou-se que a variação no teor de pó de mármore ocasionou diferenças relevantes entre as formulações, sendo que algumas proporções intermediárias resultaram em misturas menos plásticas do que aquelas com menores ou maiores teores de resíduo, possivelmente devido a interações físico-químicas entre o pó de mármore, cimento e água presentes na mistura.

No que se refere à compactação, constatou-se que o aumento do teor de resíduo tende a elevar a umidade ótima da mistura, dependendo da proporção utilizada. A massa específica aparente seca também sofreu alterações, embora em menor escala. De modo geral, mesmo com o acréscimo do pó de mármore, a massa específica das misturas manteve-se em valores próximos, indicando que o resíduo não afeta significativamente a densidade do material.

A principal diferença entre as formulações foi observada nos resultados de resistência à compressão, onde o desempenho mecânico do solo-cimento melhorou com o aumento do teor de resíduo, se comparadas as amostras compactadas na umidade ótima, evidenciando o potencial do pó de mármore como material estabilizante de solos lateríticos.

Há ainda, a evidência que a mudança de umidade pode provocar mudanças significativas tanto quanto a mudança de teor de resíduo, corroborando com a importância do estudo das propriedades das adições e mudanças de teores de resíduo e umidade na aplicação dos materiais em projetos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Vinícius Navarro por todo o suporte e apoio em laboratório.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. *NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT. *NBR 6459:2016 - Solo — Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. *NBR 7180:2016 - Solo — Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. *NBR 7182:2016 - Solo - Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. *NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT. *NBR 7181:2025 - Solo - Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ROCHAS NATURAIS. *Brasil encerra 2024 com alta de 12,7% nas exportações de rochas naturais e reforça liderança global | Centrorochas*. 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.
- CARVALHO, Aldo Ribeiro de *et al.* Influência do efeito filler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. *Ambiente Construído*, v. 23, n. 4, p. 217–239, 2023.
- 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*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental)—Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2023.
- FATHONAH, Woelandari *et al.* Sustainable soil use and management: An interdisciplinary and systematic approach. *Results in Engineering*, p. 10, 2023.
- 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.
- MÉLO, Virgiane da Silva. *Classificação e Estabilização de Solos Lateríticos do Estado da Paraíba e do Rio Grande do Norte*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Campina Grande: UFCG, 2011.
- SILVA, J. B. *et al.* Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. *Cerâmica*, v. 51, n. 320, p. 325–330, 2005.
- 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*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civi e Ambiental)—Campina Grande: Universidade Federal de 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.