XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/121

Uso de Resíduo de Mármore Para Estabilização de Solos Expansivos: Uma Revisão Sistemática

Melissa de Jesus Menezes
Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil, melissamenezesj@gmal.com

Maria do Socorro Costa São Mateus
Professora Doutora, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil, socorro@uefs.br

RESUMO: O uso de resíduos industriais na engenharia geotécnica tem se consolidado como alternativa sustentável à estabilização convencional de solos, destacando-se o pó de mármore pelo elevado volume gerado e pelo potencial de aplicação em solos expansivos. Este trabalho tem como objetivo apresentar as pesquisas existentes na literatura referentes ao tema, buscando destacar os benefícios que têm sido alcançados. Foi realizada uma revisão sistemática de estudos publicados nos últimos onze anos, analisando ensaios empregados, faixas de dosagem e efeitos nas propriedades físicas, mecânicas, volumétricas e microestruturais. A revisão não encontrou concordância unânime entre os resultados, mesmo para solos e teores semelhantes. Observou-se que a resposta do solo depende fortemente da mineralogia, do tipo de resíduo, da dosagem, do método de ensaio e do tempo de cura, resultando em grande variabilidade nos parâmetros e critérios de interpretação. Embora predomine a indicação de redução da plasticidade e da expansibilidade e aumento da resistência e da capacidade de suporte, os resultados são heterogêneos. Os resultados da pesquisa evidenciam a necessidade de metodologias mais uniformes e estudos integrados para o avanço do uso do pó de mármore na engenharia geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo de mármore, Solos expansivos, Estabilização de solos, Geotecnia ambiental.

ABSTRACT: The use of industrial waste in geotechnical engineering has established itself as a sustainable alternative to conventional soil stabilization, with marble dust standing out due to the high volume generated and its potential for application in expansive soils. This study aims to present existing research in the literature on the subject, seeking to highlight the benefits that have been achieved. A systematic review of studies published in the last eleven years was conducted, analyzing the tests used, dosage ranges, and effects on physical, mechanical, volumetric, and microstructural properties. The review did not find unanimous agreement among the results, even for similar soils and contents. It was observed that the soil response depends heavily on mineralogy, waste type, dosage, test method, and curing time, resulting in great variability in the parameters and interpretation criteria. Although the indication of reduced plasticity and expansibility and increased strength and bearing capacity predominates, the results are heterogeneous. The research results highlight the need for more uniform methodologies and integrated studies to advance the use of marble powder in geotechnical engineering.

KEYWORDS: Marble waste, Expansive soils, Soil stabilization, Environmental geotechnics.

1 INTRODUÇÃO

Solos expansivos constituem um dos principais desafios geotécnicos associados à durabilidade e à segurança de obras de engenharia civil, em razão da sua elevada variação volumétrica com o teor de umidade. A presença de argilominerais como montmorilonita e esmectitas confere elevada capacidade de absorção de água, resultando em ciclos de expansão e retração (Lacerda et al., 2020). Tais variações volumétricas são provocadas exclusivamente pela variação de umidade, promovendo fissuração na superestrutura, recalques diferenciais e deformações excessivas em pavimentos, edificações e estruturas enterradas. A intensidade dos problemas provocados dependerá da pressão de expansão do solo e do carregamento ao qual ele está submetido, podendo este último conter os efeitos da pressão de expansão. Do ponto de vista da gênese, esses

solos podem derivar da alteração intempérica de rochas ígneas básicas, como basaltos, diabásios e gabros, cuja decomposição favorece a formação de esmectitas, especialmente montmorilonita. Também se originam de rochas sedimentares finas, como folhelhos, que são argilitos compostos predominantemente por ilita e montmorilonita, e, em menor escala, de calcários impuros (Fredlund; Rahardjo; Fredlund, 2012). No Brasil, apresentam ocorrência significativa, sobretudo na Região Nordeste, onde a alternância entre estiagens prolongadas e chuvas intensas intensifica as variações de umidade. Os primeiros registros nacionais associam-se a problemas em obras rodoviárias (Sobral, 1956). Diversas técnicas têm sido empregadas para mitigar a expansibilidade, como substituição do solo e estabilização com cal e cimento, embora impliquem custos elevados e impactos ambientais relevantes (Albuquerque et al., 2020). Dosagem dos solos expansivos com areias, RCC (resíduos da construção civil) e outros resíduos sólidos têm sido testados, resultando na redução significativa da expansão. Paralelamente, o avanço da atividade industrial ao longo dos anos tem intensificado a geração de resíduos sólidos, cujo descarte inadequado representa um passivo ambiental significativo, enquanto seu reaproveitamento na construção civil se insere em estratégias voltadas à sustentabilidade. No setor de rochas ornamentais, a produção de resíduos finos é particularmente expressiva, sendo frequentemente associado à degradação de áreas de disposição, assoreamento de corpos hídricos e impactos sobre a qualidade do solo e da água. A valorização desses resíduos como insumos para a construção civil surge, portanto, como estratégia alinhada aos princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto, o uso de pó de mármore tem sido progressivamente investigado (Jain, 2020), motivado por sua disponibilidade e por sua composição rica em cálcio, capaz de interferir positivamente nas interações físico-químicas do solo. Sua incorporação promove alterações granulométricas, troca catiônica, floculação e redução da plasticidade. Todavia, apesar do crescente número de pesquisas, observa-se dispersão quanto às dosagens, aos ensaios e aos critérios de definição de teores ótimos, dificultando a consolidação do conhecimento. Assim, torna-se necessária uma análise sistemática que identifique convergências e lacunas, fornecendo base técnica mais consistente para o uso do pó de mármore na estabilização de solos expansivos.

2 METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido por meio de revisão sistemática da literatura, com o objetivo de identificar, organizar, discutir as informações encontradas e apresentar de forma sistematizada o uso de resíduos de mármore na estabilização de solos expansivos, com ênfase nos métodos experimentais, faixas de dosagem e critérios de definição dos teores mais eficientes. As buscas foram realizadas nas bases Web of Science, ScienceDirect, Elsevier e Google Scholar, com apoio do software Litmaps. O recorte foi delimitado entre os anos de 2014 e 2025, priorizando a produção recente, sem desconsiderar os conceitos e os trabalhos precursores. Das 60 publicações identificadas, 25 foram selecionadas após triagem com base em critérios de inclusão.

A análise foi conduzida em duas etapas complementares. A análise bibliométrica considerou o ano de publicação e o país de origem dos estudos, permitindo visualizar a evolução temporal e a distribuição geográfica da produção científica. A análise sistemática concentrou-se nos aspectos técnicos, contemplando: áreas investigadas; teores de substituição e faixas de dosagem; ensaios laboratoriais realizados; identificação de argilominerais; condições de cura; e impactos nas propriedades físicas e mecânicas. Com base nesses dados, foram elaborados gráficos comparativos, possibilitando identificar convergências, divergências e lacunas, bem como indicar faixas de dosagem com resultados que alcançaram o efeito desejado.

3 RESULTADOS

3.1 Distribuição temporal e geográfca dos estudos

3.1.1 Evolução cronológica

A Figura 1 apresenta a quantidade de trabalhos no tema, durante o período 2014 – 2025.

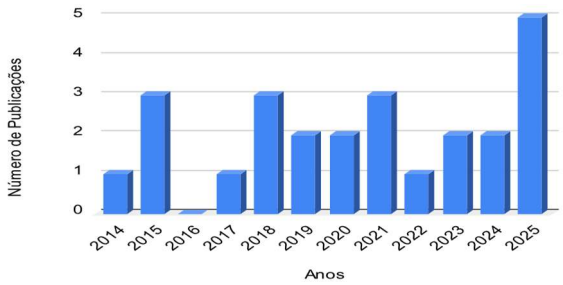


Figura 1. Número de trabalhos relacionados ao longo dos anos.

Conforme se observa, a Figura 1 evidencia não apenas o baixo número de publicações ao longo do período analisado, mas também uma tendência recente de crescimento da produção científica, especialmente no ano de 2025 que apresentou um aumento superior a 60%. Verifica-se que entre 2016 e 2017, praticamente a quantidade de estudos foi incipiente, sendo retomados em 2018 e prosseguindo com as produções até 2025. Observa-se também que houve uma queda em 2022, ano imediatamente após o período de pandemia da COVID, quando as pesquisas experimentais ficaram limitadas. Entre 2023 e 2025, a retomada do interesse acadêmico, pode estar associada à intensificação do debate sobre sustentabilidade, economia circular e reaproveitamento de resíduos industriais na engenharia. A figura mostra ainda que o tema permanece em fase de consolidação científica e demanda maior quantidade de investigações.

3.1.2 Distribuição geográfica dos estudos

A Figura 2 apresenta a distribuição geográfica dos estudos realizados no período de 2014 à 2025.

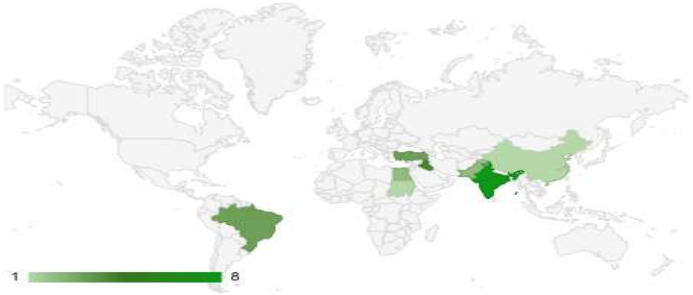


Figura 2. Distribuição geográfica dos estudos.

Conforme ilustrado na Figura 2, observa-se a produção científica concentrada majoritariamente na Índia e em países do Oriente Médio, como Iraque, Turquia, Sudão e Chipre, que juntos respondem por 68% das publicações analisadas. Esse protagonismo está diretamente associado à elevada geração de resíduos de mármore e à ampla ocorrência de solos expansivos nessas regiões. Na Índia, cerca de 95% da produção nacional de mármore concentra-se no estado do Rajastão, considerado um dos maiores pólos produtores do mundo, onde o descarte de aproximadamente 70% do material extraído tem causado impactos ambientais significativos, como aumento da alcalinidade, degradação do solo e redução da fertilidade (Jain, 2020). Adicionalmente, grandes extensões do território indiano são recobertas pelos chamados “Black Cotton Soil”, ricos em montmorilonita, argilomineral responsável por elevada expansividade, sob ciclos de umedecimento e secagem típicos do clima de monções (Gokani et al., 2018), explicando a elevada produção científica regional, voltada à mitigação simultânea de problemas geotécnicos e ambientais com o reaproveitamento de resíduos de mármore. Em contraste, o Brasil apresenta participação reduzida, apesar de estar entre os maiores produtores mundiais de mármore (Chiodi, 2021), indicando uma lacuna relevante entre potencial industrial e desenvolvimento científico aplicado.

Além dos fatores produtivos, o protagonismo científico observado nesses países está fortemente associado às condições climáticas e geológicas regionais. Índia, Iraque, Turquia, Sudão e Chipre apresentam climas predominantemente áridos a semiáridos, ou tropicais com marcada sazonalidade hídrica, caracterizados por ciclos intensos de umedecimento e secagem, que potencializam o comportamento expansivo dos solos. Do

ponto de vista geológico, essas regiões são amplamente constituídas por formações sedimentares e rochas basálticas e calcárias, cujo intemperismo químico favorece a formação de argilas do grupo das esmectitas, especialmente a montmorilonita. A associação entre clima sazonal, geologia favorável à formação de argilas expansivas e elevada disponibilidade de resíduos carbonáticos oriundos da mineração de mármore explica a concentração de estudos voltados à estabilização desses solos.

3.2 Ensaios utilizados

A avaliação do sucesso da estabilização de solos expansivos com pó de mármore é conduzida, na literatura analisada, por meio de um conjunto de ensaios laboratoriais, selecionados conforme os objetivos de cada pesquisa, a disponibilidade de infraestrutura e a relevância dos parâmetros a serem investigados. De modo geral, os autores combinam ensaios de caracterização física, mecânica, química, mineralógica e microestrutural, buscando compreender não apenas o desempenho mecânico do solo estabilizado, mas também os mecanismos responsáveis pela redução da expansibilidade. Nesse contexto, a Figura 4 apresenta a síntese dos ensaios empregados, bem como sua recorrência na bibliografia.

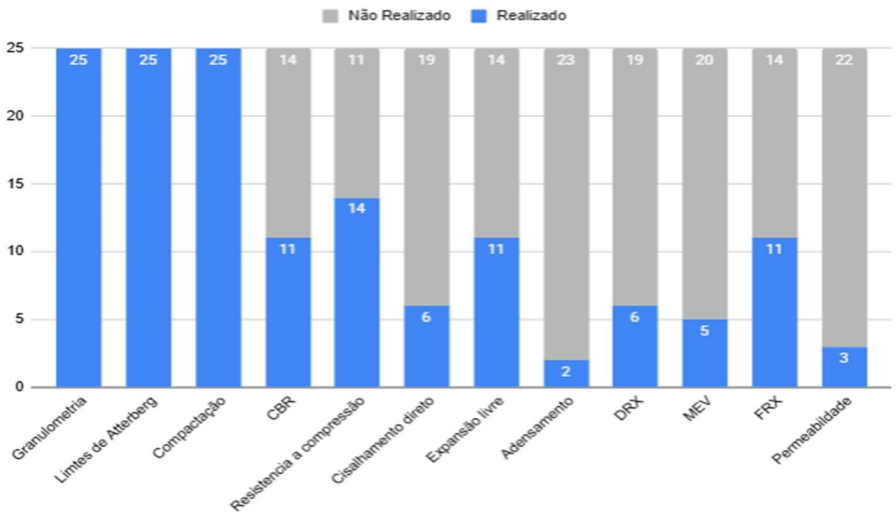


Figura 3. Ensaios usados nas diferentes amostras estudadas.

A Figura 3 evidencia os seguintes ensaios para verificar o efeito do uso do resíduo no solo: limites de Atterberg, compactação, resistência a compressão e ensaios de expansão livre. Os ensaios mineralógicos e microestruturais, como DRX, MEV e FRX, foram menos recorrentes, embora sejam fundamentais na interpretação dos mecanismos de interação entre o pó de mármore e os argilominerais, permitindo compreender a eficácia e a durabilidade do processo de estabilização. Dentre os três ensaios de mineralogia, geralmente dois deles são suficientes, sendo o MEV muito útil. É importante destacar que, independente dos parâmetros geotécnicos a serem estudados, é premissa básica realizar os ensaios de caracterização (massa específica dos grãos, granulometria e limites de Atterberg), para entender qual tipo de material está sendo avaliado. Além disso, quando se realiza dosagem de solos, os ensaios de compactação são obrigatórios para definir as condições ótimas de umidade e massa específica seca máxima a serem aplicadas no campo, de forma a garantir desempenho mecânico adequado. Quanto ao ensaio de expansão livre, este de fato avalia a eficácia da dosagem na redução do potencial de expansão, repercutindo na melhoria das propriedades mecânicas (resistência, adensamento, CBR) e hidráulicas (permeabilidade).

À luz das contribuições de Ferreira et. al (1997) e Presa (1997), observa-se que os estudos revisados ainda apresentam lacunas metodológicas relevantes na investigação de solos expansivos estabilizados. Predominam ensaios indiretos, enquanto são pouco frequentes avaliações edométricas diretas para determinação da tensão de expansão, especialmente sob condição de volume constante e considerando a trajetória de tensão durante a inundação, decisiva porque a sequência de carregamento e molhagem pode resultar em expansão ou colapso. Também são raros os estudos que incorporam ciclos de umedecimento e secagem para avaliar a propagação de fissuras e a fadiga de expansão, processos que degradam

progressivamente a resistência e a durabilidade do solo. Além disso, a limitada análise do tempo de cura pode subestimar a evolução das reações pozolânicas e do desempenho com o passar do tempo. Essas limitações indicam a necessidade de abordagens mais abrangentes voltadas à segurança e ao comportamento a longo prazo em condições reais de serviço.

3.2.1 Caracterização física

Os limites de consistência, o índice de plasticidade (IP) e o índice de atividade constituem parâmetros iniciais e fundamentais para a avaliação do potencial expansivo dos solos, pois refletem a quantidade de água requerida para transição entre estados físico–mecânicos, bem como a reatividade e coesão interna das partículas. De modo geral, os estudos analisados indicam que a incorporação de pó de mármore tende a promover a redução da plasticidade, estando esse comportamento associado tanto à presença de óxido de cálcio (CaO) no resíduo quanto à diminuição da fração argilosa na mistura.

Gokani et al (2018) ao estudar um “Black Cotton Soil” observou redução significativa do índice de plasticidade com o aumento do teor de resíduo, passando de 24,18% para 11,67% na adição de 30%, em massa. Resultado semelhante foi reportado por Fathonah et al. (2023), no estudo de uma argila orgânica de alta plasticidade da região vulcânica quaternária de Serang (Indonésia), derivada do intemperismo de depósitos de tefra e andesitos, em que o IP diminuiu à medida que aumentava a porcentagem de pó de mármore incorporado. Segundo os autores, esse comportamento está relacionado ao elevado teor de CaO presente no resíduo, que reage com a água do solo formando $Ca(OH)_2$, de natureza alcalina, acelerando o processo de ligação entre as partículas e favorecendo a agregação, o que reduz a deformabilidade do solo. De forma convergente, Jassim et al. (2022), ao estudarem um solo silte argiloso aluvionar, também atribuíram a redução do IP à formação de hidróxido de cálcio e ao aumento das ligações interpartículas. Jain et al. (2020) ressaltam que o desempenho do solo estabilizado com pó de mármore depende da composição mineralógica do solo, do teor de elementos químicos do resíduo e do tipo de solo analisado. Nessa revisão, observou-se redução da plasticidade com o aumento do teor de resíduo, todavia, a magnitude do efeito do pó de mármore sobre a plasticidade do solo é dependente da mineralogia do solo, da composição química do resíduo e do teor adotado, sendo que no universo da literatura adotada, esses teores de adição, em relação à massa de solo, variaram amplamente de 3% a 90%.

Como paralelo, Lacerda et al (2020), ao investigar a estabilização de um solo potencialmente expansivo com cinza de casca de arroz, verificou que o aumento do teor de CCA promoveu substituição parcial da fração argilosa por um resíduo de menor superfície específica. Como efeito da reação pozolânica, ocorreu cimentação entre os grãos do solo e a cinza, mantendo praticamente constante o Limite de Liquidez e promovendo aumento progressivo do Limite de Plasticidade, o que resultou na redução do índice de plasticidade. Embora se trate de outro material, o estudo denota que a adição em massa de resíduos finos com capacidade de interação química altera a estrutura do solo e repercute diretamente nos índices físicos, evidenciando que as características físico-químicas do resíduo são determinantes para a redução do IP.

3.2.2 Caracterização mineralógica

No universo das literaturas analisadas, observa-se que apenas cerca de 40% dos trabalhos realizaram efetivamente a caracterização mineralógica por DRX, o que limita comparações e evidencia uma lacuna metodológica na literatura.

Os estudos de Abdulla e Majeed (2021) evidenciam que a eficiência do pó de mármore como estabilizante não depende apenas do teor adicionado, mas está fortemente condicionada à mineralogia do solo e à origem geológica do resíduo, pois, para um mesmo teor de 30% de adição, os solos de Bastora (BA) e da Região do Aeroporto de Erbil (EA) apresentaram respostas distintas. O solo de Bastora desenvolve-se a partir do intemperismo das formações Mukdadiya e Injana, com ocorrência de terraços fluviais, enquanto o solo do Aeroporto de Erbil, é constituído por espessa camada de sedimentos quaternários não consolidados. Além disso, verificou-se que diferentes pós de mármore produziram desempenhos distintos quando aplicados ao mesmo solo. Com 30% de adição, o pó de mármore de Penjwen promoveu reduções do índice de plasticidade de aproximadamente 46,2% no

solo de BA e 49,3% no solo de EA, enquanto o pó de Pirmam reduziu 31,4% e 35,9%, respectivamente. Essa eficácia superior do pó de Penjwen é atribuída à sua origem metamórfica, associada à composição mineralógica mais favorável (calcita recristalizada e menor influência de rochas carbonáticas não metamorfizadas), ao passo que o pó de Pirmam, de origem sedimentar e com maior teor de minerais carbonáticos, apresentou menor eficiência na modificação dos índices físicos.

3.2.3 Caracterização mecânica

Os resultados dos ensaios de compactação indicam, de forma geral, que a adição de pó de mármore tende a aumentar a densidade aparente seca máxima e reduzir o teor de umidade ótima (w_{ot}), embora esse comportamento não seja uniforme para todos os solos e teores analisados. Sharma et al (2025) observou em solo argiloso aluvial, formado por sedimentos ricos em ilita, clorita, esmectita e caulinita, melhorias significativas para 15% de adição com aumento da densidade seca e redução da (w_{ot}), evidenciando benefícios diretos para aplicações em subleitos. Tendência semelhante foi reportada por Hwayyiz et al. (2023), em solo expansivo da região de Erbil, que identificaram comportamento ótimo para 18% de adição, associado à melhoria da granulometria e ao aumento da concentração de eletrólitos na água dos poros, favorecendo a floculação das partículas. Diversos autores associam a redução da (w_{ot}) à diminuição da fração argilosa e da área superficial específica.

Nos ensaios de resistência à compressão não confinada, a maioria dos estudos aponta ganhos expressivos, embora novamente dependentes do teor e do tipo de solo. Em solo expansivo originado de sedimentos aluviais derivados do intemperismo de rochas ígneas e metamórficas do Planalto Etíope, Zumrawi (2018) reportou aumento de até 3,7 vezes na resistência com 20% de pó de mármore, enquanto Sharma et al (2025) observou incremento de até 4 vezes após 28 dias de cura para o teor de 15%. Esses ganhos são atribuídos à formação de compostos cimentantes, decorrentes de reações pozolânicas envolvendo o CaO presente no resíduo. Contudo, em um solo argiloso analisado por Umar et al (2024), derivado do intemperismo de granitos peraluminosos e rochas metamórficas, com mineralogia predominantemente caulinítica, nota-se que teores excessivos podem ser prejudiciais, por identificar redução da resistência para adições acima de 75%, indicando um limite superior de eficiência.

Os ensaios de expansão livre e CBR confirmam a eficácia do pó de mármore na estabilização de solos expansivos. Reduções significativas do inchamento, em alguns casos próximas à eliminação do comportamento expansivo, foram observadas para teores em torno de 15%, acompanhadas por aumentos expressivos do CBR, inclusive em condição saturada (Sharma et al, 2025). Esses ganhos são atribuídos à redução da fração argilosa ativa, à melhor compactação e ao adensamento da matriz do solo. As análises por MEV reforçam essa interpretação ao indicar estruturas mais densas, com menor porosidade e melhor ligação interpartículas, evidenciando o potencial do pó de mármore para aplicações em subleitos e sub-bases rodoviárias. Adicionalmente, uma vez que a resistência à compressão não confinada e ao cisalhamento tendem a evoluir com o avanço da cura (Umar et al, 2024), novas pesquisas serão importantes, considerando-se que apenas cerca de 36% dos trabalhos analisados considerarem diferentes idades de cura.

3.3 Análise do teor ideal

A análise comparativa das dosagens investigadas evidencia que os teores de 20% e 30% de pó de mármore foram utilizadas na maior parte dos estudos, configurando-se como as faixas mais recorrentes de desempenho favorável. O teor de 20% foi adotado como ótimo em pesquisas conduzidas na Índia, Turquia, Paquistão e Sudão, indicando um consenso quanto à eficácia dessa dosagem na mitigação da expansibilidade e na melhoria das propriedades mecânicas do solo, mesmo em contextos geográficos distintos. Já o teor de 30% destacou-se como o mais frequentemente indicado como ideal em estudos realizados no Brasil, Índia, Iraque e Turquia, sendo que, em trabalhos indianos e brasileiros, essa convergência está associada a solos com predominância de montmorilonita, argilomineral reconhecido por sua elevada capacidade de expansão, e sendo o pó de mármore empregado, em sua maioria, proveniente de rocha metamórfica calcária.

Entretanto, os estudos conduzidos na Turquia, Paquistão e Sudão não apresentam análises mineralógicas por DRX. Essa ausência dificulta a verificação da similaridade mineralógica com os estudos indianos que

adotaram 30% como teor ótimo de resíduo e limita a interpretação dos mecanismos responsáveis pelo desempenho observado.

Nos estudos conduzidos na Turquia por Soğanci et al (2023), foram analisadas argilas de baixa (CL) e alta plasticidade (CH), ambas de origem predominantemente vulcânica, associadas a tufos e materiais sedimentares neógenos da região da Capadócia. O pó de mármore utilizado foi proveniente de mármore metamórfico calcítico com teor elevado de CaO (54,25%). Nesses casos, observou-se que a resposta do solo à estabilização variou em função da plasticidade: solos do tipo CH apresentaram aumento proporcional mais significativo na densidade seca máxima e redução mais acentuada do teor ótimo de umidade, em comparação aos solos CL. Tais diferenças foram atribuídas à maior capacidade de troca catiônica e à espessura da dupla camada difusa em argilas de alta plasticidade, o que intensifica os efeitos da adição de Ca^{2+} proveniente do resíduo.

A Figura 4 ilustra a expressiva dispersão das faixas de dosagem investigadas na literatura e variabildade de teores adotados como ideais, reforçando a influência de fatores como mineralogia do solo, origem e composição do resíduo.

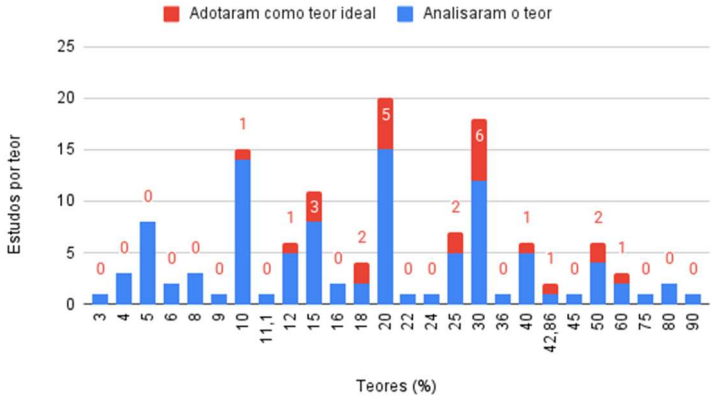


Figura 4. Recorrência dos teores analisados e adoção como dosagem ótima.

4 CONCLUSÃO

Esta revisão evidenciou que o pó de mármore apresenta elevado potencial como agente estabilizante de solos expansivos, promovendo reduções significativas da expansividade e melhorias relevantes nas propriedades físicas, mecânicas e funcionais do solo. De modo geral, a substituição parcial da fração argilosa por um material contribui para a diminuição da plasticidade, do inchamento e da sensibilidade à variação de umidade, além de favorecer o aumento da densidade seca, da resistência à compressão e da capacidade de suporte, ampliando a viabilidade do uso desses solos em obras geotécnicas e rodoviárias.

De modo geral, a incorporação do pó de mármore promove alterações granulométricas, troca catiônica imediata, floculação das partículas e redução das forças repulsivas intergranulares. A presença de CaO favorece a formação de $Ca(OH)_2$ e o desenvolvimento de reações pozolânicas com SiO_2 e Al_2O_3 presentes na matriz argilosa, resultando na formação de produtos cimentícios, responsáveis pelo incremento da resistência mecânica. Assim, quanto maior a pureza calcítica do mármore de origem, característica comum a rochas metamórficas derivadas de calcários recristalizados, maior tende a ser a disponibilidade de CaO e, consequentemente, o potencial de estabilização.

A análise também revelou lacunas importantes nos estudos existentes. Destacam-se a limitada consideração dos efeitos do tempo de cura, a pouca utilização de ensaios edométricos diretos para determinação da tensão de expansão, especialmente sob condição de volume constante e considerando a trajetória de tensão durante a inundação, e a escassez de investigações que avaliem o comportamento dos solos estabilizados sob ciclos sucessivos de umedecimento e secagem, condição mais representativa do desempenho em campo, incluindo a fadiga de expansão associada às variações volumétricas repetidas. Além disso, a ausência recorrente de caracterização mineralógica detalhada em parte dos estudos dificulta a correlação entre mecanismos microestruturais e respostas macroscópicas.

Dessa forma, conclui-se que, embora o uso do pó de mármore represente uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente favorável para a estabilização de solos expansivos, seu emprego deve ser precedido

por uma caracterização integrada do solo e do resíduo, bem como por análises que considerem a evolução temporal e os efeitos cíclicos de umidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdulla, R.; Majeed, N. (2021) Improvement of engineering properties of expansive soil using waste marble powder. *Iraqi Geological Journal*, 54 (1E), p. 43–53.

Albuquerque, F.C., Margalho, L.S.G., Burgos, P.C., Borges, L.M., Rivetti, M.L.S., Cardoso, L.S.P. (2020) Review of expansive soil stabilization methods. In: *Anais do VI Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia*. São Paulo: Blucher, p. 217–225.

Chiodi, C.F. (2021) *Balance of exports, imports and Brazilian domestic consumption of ornamental stones in 2020*. Brasília: ABIROCHAS, Informe n. 01/2021.

Fathonah, W.; Kusuma, R. I.; Mina, E.; Hasanah, N. D. (2023) Sustainable soil stabilization using marble dust waste on high plasticity soils: Physical and mechanical properties study. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 20 (4), p. 1–10.

Ferreira, S. R. M. (1997) Características de variação de volume de um Vertissolo devido à mudança do teor de umidade. In: *Anais do III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados – ÑSAT*. Rio de Janeiro, p. 131–138.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H., Fredlund, M.D. (2012) *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Gokani, H. K.; Akoliya, K. D.; Davera, D. N.; Vaghela, P. J.; Patel, V. R. (2018) Efeito do pó de mármore residual nas propriedades índice de solos expansivos. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, v. 5, n. 11, p. 980-986.

Hwayyiz, C.A., Hasan, A.M., Hummadi, R.A., Ibrahim, H.H. (2023) Impact of marble powder on the geotechnical behavior of expansive soil. Zanco Journal of Pure and Applied Sciences, 35 (1), p. 30–37.

Jain, A.K., Jha, A.K., Shivanshi (2020b) Geotechnical behaviour and microanalysis of expansive soil treated with marble dust. *Soils and Foundations*, 60 (4), p. 737–751.

Jassim, N.W., Hassan, H.A., Mohammed, H.A., Fattah, M.Y. (2022) Utilization of waste marble powder as sustainable stabilization materials for subgrade layer. *Results in Engineering*, 14, 100436.

Lacerda, L. S. N.; Constantino, C. S.; Bezerra, A. L.; Ferreira, S. R. M. (2020) Influência da adição de cinza de casca de arroz em solos expansivos nos municípios de Paulista, Cabrobó e Brejo da Madre de Deus no estado de Pernambuco/Brasil. In: *Atas do 16.º Congresso Nacional de Geotecnia*, v. 1, p. 1321–1329.

Presa, E.P. (1997) The swelling fatigue in unsaturated expansive soils. In*: Proceedings of the 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils*. Rio de Janeiro: ABMS, v. 1, p. 47–54.

Sharma, A.; Kour, J.; Senagah, A.; Tiwary, A. K.; Singh, K.; Juneja, G.; Verma, K.; Gupta, R.; Kumar, N. (2025) Eco-friendly stabilization of high plasticity soils using marble industry waste and molasses. Discover Materials, 5, 222.

Sobral, H. S. (1956) Contribuição ao estudo dos massapés como solos para construção. Tese (Cátedra de Matérias de Construção) – Escola de Belas Artes, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

Soğancı, A. S.; Yenginar, Y.; Orman, A. (2023) Propriedades geotécnicas de solos argilosos estabilizados com pó de mármore e escória granulada de alto-forno. KSCE Journal of Civil Engineering, 27, p. 4622–4634.

Umar, I. H.; Lin, H. (2024) Marble powder as soil stabilizer: an experimental investigation of geotechnical properties and unconfined compressive strength analysis. Materials, 17, 1208

Zumrawi, M.M., Abdalla, E.A.E. (2018) Stabilization of expansive soil using marble waste powder. In: Conference Proceedings Civil Engineering, v. 2018.