ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

RESÍDUOS DE CORTE DE MÁRMORE E GRANITO NA MELHORIA DE SOLOS PROBLEMÁTICOS: MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO E JANELA DE DOSAGEM

MARBLE AND GRANITE CUTTING WASTE FOR THE IMPROVEMENT OF PROBLEMATIC SOILS: STABILIZATION MECHANISMS AND DOSAGE WINDOW

RESIDUOS DE CORTE DE MÁRMOL Y GRANITO EN LA MEJORA DE SUELOS PROBLEMÁTICOS: MECANISMOS DE ESTABILIZACIÓN Y VENTANA DE DOSIFICACIÓN

doi.org/10.53426/con.v5i0.009

Henrique Duarte de Oliveira[1]; Valéria Cristina de Morais Zanquini[2]; Jonatas dos Santos Ribeiro[3]; Dionei José Serafin Wieczorek[4]; Carlos Eduardo de Carvalho e Silva[5]; Julio Santos Guerra Neyra[6]
[1–6] Graduandos em Engenharia Civil, Faculdade Única EAD, Ipatinga-MG. [1] hdo.henrique.duarte@gmail.com, ORCID: 0009-0001-2963-9356; [2] eng.valeriamorais@gmail.com, ORCID: 0009-0005-2752-4853; [3] jon_jonatas@outlook.com, ORCID: 0009-0003-4385-2182; [4] wieczorekdionei@gmail.com, ORCID: 0009-0001-5492-4300; [5] carlos.silva@hydrostec.com.br, ORCID: 0009-0002-0274-9552; [6] juliog2773@gmail.com, ORCID: 0009-0004-9261-986X

Grupo de Trabalho: GT 9 – Engenharias, Arquitetura, Urbanismo e Infraestrutura

RESUMO

A destinação dos resíduos de corte de mármore e granito (RCMG) permanece um passivo relevante da cadeia produtiva de rochas ornamentais, setor no qual o Brasil ocupa a quarta posição mundial. Entre as rotas de reaproveitamento, a melhoria de solos problemáticos concentra o maior volume de evidência experimental e, simultaneamente, as maiores inconsistências interpretativas. O objetivo foi reavaliar criticamente essa evidência, examinando a magnitude dos efeitos reportados e a consistência dos mecanismos invocados para explicá-los. Adotou-se reanálise de dados secundários sobre sete estudos primários, com extração padronizada dos valores de controle e tratamento, apreciação do risco de viés em seis domínios e aplicação de um modelo de referência inédito no tema: a lei de mistura, que estima a resposta esperada caso o único mecanismo atuante fosse a substituição granulométrica. Nos estudos analisados, o resíduo reduziu o índice de plasticidade entre 30,2 % e 47,1 % para teores de 25 % a 50 % em massa, elevou a massa específica seca máxima, reduziu a umidade ótima e multiplicou o Índice de Suporte Califórnia por até 2,8 vezes. A resposta, contudo, não se mostrou monotônica: o desempenho máximo ocorreu em 25 % de resíduo, com perda de 47 % da capacidade de suporte em 35 %. O modelo indicou que, em teores de 25 % a 30 %, o ganho supera a diluição em 16,7 % a 24,4 %, enquanto em 50 % o desempenho é 39,6 % inferior ao previsto; a eficiência anula-se em 35,2 %, valor próximo ao teor em que se observou o colapso da capacidade de suporte em ensaios brasileiros. Verificou-se ainda que a atribuição corrente dos ganhos a reações pozolânicas não encontra respaldo na evidência microestrutural do conjunto. Os resultados sugerem que o RCMG atua predominantemente como estabilizante físico e granulométrico e apontam janela de dosagem entre 15 % e 25 % em massa, compatível com reforço de subleito e sub-base, mas insuficiente, isoladamente, para camada de base. Dado o número reduzido de estudos, tais conclusões constituem hipóteses fundamentadas, sujeitas a confirmação experimental.

Palavras-chave: Resíduo de corte de mármore e granito; Estabilização de solos; Índice de Suporte Califórnia; Pavimentação; Economia circular.

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva de rochas ornamentais desperdiça mais material do que entrega. Nas etapas de extração, serragem e acabamento as perdas ultrapassam metade do volume lavrado, e a fração mais problemática é a lama fina da serragem e do polimento, cuja granulometria e cujo volume inviabilizam a destinação convencional (Gobbo et al., 2004). O Brasil é o quarto maior produtor mundial de rochas naturais (Abirochas, 2025).

Entre as rotas de reaproveitamento, a melhoria de solos é a que absorve maior volume de material por obra executada, e há coincidência geográfica favorável: os polos de beneficiamento do semiárido nordestino e do leste mineiro coexistem com solos problemáticos que dependem de cal ou cimento. A literatura é volumosa e, em aparência, convergente: estudos de seis países relatam, quase unanimemente, redução do índice de plasticidade, aumento da massa específica seca máxima, elevação da capacidade de suporte e diminuição do potencial expansivo; a revisão mais recente no país confirma essas tendências e registra que o campo ainda não dispõe de tratamento estatístico dos resultados acumulados (Prandina; Farias, 2026).

É aí que se instala a lacuna. Revisões que somam resultados favoráveis deixam três problemas sem enfrentamento: falta um referencial que separe o ganho da substituição de material daquele atribuível a efeito adicional; não se define o teor a partir do qual o ganho se inverte; e atribuem-se correntemente os ganhos a reações pozolânicas promovidas pelo cálcio do pó de mármore, quando a pozolanicidade pressupõe sílica ou alumina amorfas reagindo com hidróxido de cálcio em pH elevado, condição que a calcita não estabelece por si só (Mitchell; Soga, 2005). O objetivo foi reavaliar essa evidência, examinando a magnitude dos efeitos, a existência de um teor de inversão e a consistência dos mecanismos, com enquadramento nas especificações rodoviárias brasileiras.

METODOLOGIA

A pesquisa configura-se como reanálise crítica de dados secundários, em que o ineditismo reside no tratamento analítico aplicado a resultados publicados. Não se trata de metanálise: os estudos primários da área raramente reportam medidas de dispersão, o que inviabiliza estimadores com ponderação por variância.

A busca foi conduzida em mecanismos de busca acadêmica de cobertura ampla e em bases de acesso aberto, com expressões booleanas combinando descritores de resíduo (marble dust, granite dust, stone cutting waste, RCMG, pó de mármore, lama de marmoraria) e de aplicação (soil stabilization, expansive soil, subgrade, California Bearing Ratio, estabilização de solos, subleito), complementada por rastreamento de citações a partir das revisões disponíveis (Prandina; Farias, 2026). Registra-se, para efeito de transparência, que bases de acesso restrito, como Scopus e Web of Science, não foram consultadas e que os quantitativos de recuperação e exclusão por base não foram registrados, razão pela qual não se apresenta fluxograma: trata-se de busca exploratória, não de triagem exaustiva.

Foram elegíveis os estudos primários que aplicassem resíduos do beneficiamento de mármore ou granito a solos e reportassem limites de consistência, parâmetros de compactação, Índice de Suporte Califórnia ou variação volumétrica, excluídos os trabalhos sobre matrizes cimentícias, cerâmicas ou asfálticas. Aplicados esses critérios, sete estudos primários, de seis países e distribuídos por vinte e dois anos, compuseram o conjunto analisado, todos submetidos a apreciação de risco de viés em seis domínios: caracterização do resíduo e do solo, replicatas e dispersão, energia de compactação e cura, rigor editorial do veículo e disponibilidade dos valores primários. Dois foram classificados como de risco global alto e mantidos por fornecerem pares de controle e tratamento que nenhum outro supre. A etapa quantitativa exigiu condição adicional, o relato simultâneo do índice de

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

plasticidade de controle e de tratamento em fração mássica declarada, atendida por três dos sete estudos; os quatro restantes, por reportarem apenas valores finais sem controle, por empregarem coaditivo reativo sem discriminar a fração de resíduo ou por não informarem o índice de plasticidade da mistura, permaneceram na discussão qualitativa.

Sob a hipótese nula de que o resíduo, praticamente não plástico, apenas substitui parte da fração argilosa ativa, o índice de plasticidade decresce linearmente com a fração mássica incorporada, conforme a lei de mistura, e a eficiência relativa E mede o desvio entre observado e previsto: valores positivos indicam redução superior à explicável pela diluição; negativos, desempenho inferior ao de um inerte equivalente.

$$IP\,prev = IP0 \cdot (1 - f) \qquad (1)$$

$$E = [(IP\,prev - IP\,obs) / IP\,prev] \cdot 100 \qquad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A redução do índice de plasticidade verifica-se nos sete estudos, entre 30,2 % e 47,1 % nos tratamentos isolados, mas o exame de seus componentes revela divergência que a leitura agregada não capta: Başer (2009) reporta elevação de 23,3 % no limite de plasticidade e Abdelkader, Hussein e Ye (2021), redução de 24,8 %, embora ambos convirjam na queda do limite de liquidez. A elevação do limite de plasticidade costuma ser associada à floculação por troca catiônica, e a redução simultânea de ambos, à substituição granulométrica.

Os efeitos sobre a compactação são convergentes: Abdelkader, Hussein e Ye (2021) registram elevação da massa específica seca máxima de 1,908 g/cm³ para 2,059 g/cm³ e redução da umidade ótima de 13,1 % para 11,2 % com 25 % de resíduo. A explicação mais parcimoniosa é física: o resíduo tem grãos mais densos que a fração argilosa substituída, 2,823 g/cm³ no material brasileiro (Oliveira, 2015), e sua natureza não plástica reduz a demanda de água. Moura e Gonçalves (2002) elevaram o Índice de Suporte Califórnia de 13 % para 36 % com 25 % de RCMG.

A literatura tende a reportar melhoria crescente com a adição, formulação correta apenas porque a maior parte dos estudos não ultrapassa 30 %. Moura e Gonçalves (2002), único a testar teor superior com medição de suporte, revelam a inversão: o ISC sobe para 26 % com 15 % de resíduo, atinge 36 % com 25 % e recua para 19 % com 35 %, teor em que a expansão, nula nas demais misturas, passa a 0,2 %. O modelo de referência aplicado aos três estudos elegíveis produz o resultado da Tabela 1.

Tabela 1 - Eficiência relativa do resíduo em relação à lei de mistura

Estudo primário	Teor f (%)	IP obs. / IP contr.	Previsto (1 − f)	Eficiência E (%)
Abdelkader, Hussein e Ye (2021)	25	0,625	0,750	+16,7
Başer (2009)	30	0,529	0,700	+24,4
Bhavsar et al. (2014)	50	0,698	0,500	−39,6

Fonte: elaborada pelo autor (2026), conforme as Equações 1 e 2.

O ajuste linear aos três pontos fornece E = 88,8 − 2,52f, com coeficiente de determinação de 0,91, e anula-se em f igual a 35,2 %. A fragilidade estatística se declara: com três observações o coeficiente é descritivo, não comporta inferência nem extrapolação. O interesse não está na precisão, mas na convergência: o teor em que o modelo indica eficiência nula aproxima-se daquele em que Moura e Gonçalves (2002) observaram o colapso da capacidade de suporte. A coincidência é sugestiva, não demonstrativa.

Quanto ao mecanismo, a evidência microestrutural não sustenta a hipótese pozolânica: Abdelkader, Hussein e Ye (2021) registram aumento do teor de calcita com o teor de pó de mármore, ou seja, a difração detectou a fase adicionada, e não silicato ou aluminato de cálcio hidratado. Quanto

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

às micrografias de Saygili (2015), a objeção é metodológica: a microscopia eletrônica fornece morfologia, não identificação de fases. O ensaio capaz de decidir a questão não foi executado em nenhum dos sete estudos, e essa ausência é, em si, um resultado desta reanálise. A leitura aqui proposta, de predomínio de efeito físico, é a mais compatível com as evidências, mas permanece sujeita a verificação.

Para o projetista, a pergunta é em qual camada a mistura cabe. Com ISC de 36 % e expansão nula, o traço de melhor desempenho supera o mínimo de 20 % exigido pela DNIT 139/2010-ES para sub-base estabilizada granulometricamente, condicionado ao Índice de Grupo nulo, que o estudo original não reporta. Para base não atende: a DNIT 141/2010-ES exige ISC mínimo de 60 % e índice de plasticidade até 6 %.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sete estudos convergem quanto à direção dos efeitos do RCMG sobre solos problemáticos, e essa convergência, verificada em seis países e ao longo de duas décadas, é o achado mais sólido do conjunto. A magnitude do benefício, porém, parece dever-se em boa parte à diluição da fração argilosa ativa: o efeito adicional estimado fica entre 16,7 % e 24,4 % em teores de 25 % a 30 %, ordem de grandeza mais compatível com floculação por troca catiônica limitada do que com cimentação. A resposta ao teor não se mostrou monotônica, e os dados sugerem janela útil entre 15 % e 25 % em massa, situando a mistura em reforço de subleito e sub-base, não em base sem ligante hidráulico.

As limitações delimitam o alcance dessas afirmações: o corpus resultou de busca exploratória com rastreamento de citações, sem triagem sistemática nem registro de recuperação por base; sete estudos, dois deles de risco de viés alto, constituem base estreita; a eficiência relativa apoia-se em três pontos e o ponto de inversão, em um único trabalho; e a heterogeneidade de solos, resíduos e protocolos limita a comparabilidade. A janela de dosagem deve ser lida como hipótese fundamentada, não como parâmetro de projeto. Como agenda, destacam-se o ensaio discriminante do mecanismo, a caracterização mineralógica obrigatória do resíduo e ensaios com solos tropicais lateríticos brasileiros.

REFERÊNCIAS

ABDELKADER, H. A. M.; HUSSEIN, M. M. A.; YE, H. Influence of waste marble dust on the improvement of expansive clay soils. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, art. 3192122, 2021.

ABIROCHAS. **Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2024**. Informe 01/2025. Brasília: Abirochas, 2025.

BAŞER, O. **Stabilization of expansive soils using waste marble dust**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Middle East Technical University, Ancara, 2009.

BHAVSAR, S. N. et al. Impact of marble powder on engineering properties of black cotton soil. **International Journal for Scientific Research & Development**, v. 1, n. 12, p. 136-139, 2014.

DNIT. **Norma DNIT 139/2010-ES: pavimentação - sub-base estabilizada granulometricamente**. Rio de Janeiro: IPR, 2010a.

DNIT. **Norma DNIT 141/2010-ES: pavimentação - base estabilizada granulometricamente**. Rio de Janeiro: IPR, 2010b.

GOBBO, L. A. et al. Aproveitamento de resíduos industriais. In: A cadeia produtiva de rochas ornamentais no Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 2004. p. 129-152.

LIMA, José Francinildo Matias et al. Análise de aspectos e impactos ambientais de um lixão. **Revista de Geopolítica**, v. 16, n. 5, e743, 2025. DOI: 10.56238/revgeov16n5-008.

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

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

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P. Aproveitamento dos resíduos finos das serrarias de Santo Antônio de Pádua/RJ. In: ENTAC, 9., 2002, Foz do Iguaçu. Anais [...]. ANTAC, 2002. p. 1653-1660.

OLIVEIRA, T. **Caracterização do resíduo de serragem de rochas ornamentais para aplicações geotécnicas**. 2015. Dissertação (Mestrado) - EESC/USP, São Carlos, 2015.

PRANDINA, J. R. R.; FARIAS, M. M. Resíduos da indústria de rochas ornamentais em misturas de solos para aplicações geotécnicas: uma revisão de literatura. **Transportes**, v. 34, art. e3155, 2026.

RAFAEL, Clélio Rodrigo Paiva; GARCIA, Joan; SUBTIL, Eduardo Lucas. Reliability-Based Evaluation of the Robustness of Constructed Wetlands for Sustainable Sanitation: Implications for Design and Operation. Water environment research: a research publication of the Water Environment Federation, v. 98, n. 9, p. e70572, 2026. DOI: https://doi.org/10.1002/wer.70572

SAYGILI, A. Use of waste marble dust for stabilization of clayey soil. **Materials Science**, v. 21, n. 4, p. 601-606, 2015.