

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/134

Fatores-chave de sucesso para aplicação de novos geomateriais

Giovanna Monique Alelvan

Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, giovannaalelvan@etg.ufmg.br

Hugo Naves Coelho Santos

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, hugo.naves96@gmail.com

Rodrigo Cesar Pierozan

Professor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, rodrigopierozan@utfpr.edu.br

Leise Kelli de Oliveira

Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, leise@etg.ufmg.br

RESUMO: Geomateriais (GMs) compreendem o conjunto de materiais utilizados na Geotecnia, incluindo elementos naturais como solos e rochas, e elementos processados artificialmente, como resíduos da mineração e geossintéticos. No entanto, dois desafios recorrentes impactam projetos geotécnicos: a escassez de materiais que atendam aos critérios de engenharia na região, resultando em custos elevados de transporte, e a necessidade de explorar novos depósitos, o que acarreta impactos ambientais significativos. Nesse contexto, os Novos Geomateriais (NGs) surgem como uma abordagem para estabilização e reforço, envolvendo a inclusão de materiais não convencionais nos GMs. Isso amplia as possibilidades de uso de materiais locais e cria oportunidades para reutilização de resíduos. Apesar da ampla divulgação e da base sólida na literatura científica, a aplicação prática dessas inovações na Geotecnia enfrenta limitações. Neste contexto, este estudo avaliou os Fatores-Chave de Sucesso (FCS) relacionados à aplicação de NGs em estruturas geotécnicas. Utilizando o método Delphi e um questionário estruturado após revisão extensiva da literatura, especialistas brasileiros dos setores público, privado e acadêmico foram consultados para identificar obstáculos e possíveis caminhos para a aplicação prática de NGs. Os resultados apontaram que a falta de padronização, a complexidade do comportamento dos novos geomateriais em diversas condições e limitações técnicas e econômicas são barreiras que dificultam a adoção generalizada de NGs. Como conclusão, foi elaborado um plano de ação (*roadmap*) contemplando uma série de medidas para facilitar a adoção mais ampla de NGs.

PALAVRAS-CHAVE: Novos Geomateriais; Método Delphi; Inovação; Fatores chave de sucesso.

ABSTRACT: Geomaterials (GMs) comprise the set of materials used in Geotechnics, including natural elements such as soils and rocks, and artificially processed elements, such as mining waste and geosynthetics. However, two recurring challenges impact geotechnical projects: the scarcity of materials that meet engineering criteria in the region, resulting in high transportation costs, and the need to explore new deposits, which entails significant environmental impacts. In this context, New Geomaterials (NGs) emerge as an approach for stabilization and reinforcement, involving the inclusion of unconventional materials in GMs. This expands the possibilities of using local materials and creates opportunities for waste reuse. Despite widespread dissemination and a solid foundation in the scientific literature, the practical application of these innovations in Geotechnics faces limitations. In this context, this study evaluated the Key Success Factors (KSFs) related to the application of NGs in geotechnical structures. Using the Delphi method and a structured questionnaire after extensive literature review, Brazilian experts from the public, private, and academic sectors were consulted to identify obstacles and possible paths for the practical application of NGs. The results indicated that lack of standardization, complexity of the behavior of new geomaterials under various conditions, and technical and economic limitations are barriers that hinder the widespread adoption of NGs. In conclusion, an action plan (*roadmap*) was developed encompassing a series of measures to facilitate the broader adoption of NGs.

KEYWORDS: New Geomaterials; Delphi Method; Innovation; Key Success Factors.

1 INTRODUÇÃO

Novos Geomateriais (NGs) são soluções materiais inovadoras aplicadas em estruturas geotécnicas que visam adaptar materiais locais ao comportamento de engenharia necessário. Esta é uma estratégia fundamental para reduzir a exploração de materiais naturais e os custos e emissões associados ao transporte. A aplicação de NGs pode ser uma forma atraente de trabalhar em direção a estratégias de mitigação, reduzindo as emissões relacionadas ao transporte de materiais, e adaptação, em casos onde os compostos se comportam de forma mais eficaz diante de riscos (Han & Thakur, 2015; Sinoh et al., 2023).

Para o desenvolvimento de NGs, são aplicadas técnicas de estabilização e reforço. A técnica de estabilização abrange soluções com aditivos químicos, que reagem com o material natural, ou misturando materiais com distribuições de tamanho de partícula complementares para formar uma estrutura mais estável. A técnica de reforço visa formar compósitos com inclusões de materiais com resistência à tração para complementar o comportamento de materiais granulares, possibilitando uma ampla gama de aplicações de engenharia, incluindo estabilização de encostas, construção de muros de contenção e projeto de pavimentos (Gao et al., 2011; Koohmishi & Palassi, 2022; Liu, 2018).

Essas tecnologias podem ser usadas individualmente ou em combinação, maximizando os benefícios inerentes às técnicas. A principal vantagem do uso desses materiais reside na substituição de materiais de construção convencionais, como areia e cascalho, que podem estar associados a impactos ambientais significativos devido à necessidade de extração de depósitos naturais. Além disso, muitas das novas tecnologias têm a característica de um melhor controle de qualidade dos produtos, permitindo uma melhor previsão do comportamento da estrutura final mesmo na fase de projeto.

No entanto, o uso de NGs em projetos de engenharia geotécnica pode ser limitado pela falta de padrões de teste estabelecidos, custos iniciais mais altos e preocupações potenciais com a obtenção de matéria-prima. Apesar de uma compreensão geral dos possíveis fatores relacionados às limitações do uso de NGs, há uma lacuna na literatura sobre os possíveis fatores-chave de sucesso (KSFs) que poderiam alterar esse cenário e facilitar a implementação de NGs em estruturas terrestres.

Com base nisso, surgem as seguintes questões de pesquisa: (i) Quais são os fatores-chave de sucesso (KSFs) para a aplicação prática de NGs? e (ii) Como os *stakeholders* envolvidos na tomada de decisão podem contribuir para apoiar o desenvolvimento e uso de NGs?

Neste contexto, este artigo tem como objetivo identificar os KSFs para o uso de NGs em grande escala. Além disso, este artigo propõe um plano de ação para abordar as barreiras identificadas com base na opinião de profissionais brasileiros renomados que atuam na engenharia geotécnica. A opinião dos especialistas foi avaliada utilizando o método Delphi. Com base nos resultados, foi possível identificar os KSFs para o uso em larga escala de NGs, juntamente com as barreiras correlacionadas.

Este estudo introduz uma nova dimensão ao campo ao pioneirar a aplicação do Método Delphi no contexto específico dos Novos Geomateriais. Nenhuma literatura anterior documentou a utilização do Método Delphi neste contexto particular. Essa aplicação distinta não apenas destaca a natureza inovadora desta pesquisa, mas também amplia os limites das metodologias tradicionais de avaliação.

2 METODOLOGIA

Apesar dos avanços recentes no desenvolvimento de NGs, ainda existe uma lacuna na aplicação prática deste grupo de materiais. Para explorar essa lacuna, foi empregado um processo em quatro etapas, consistindo em uma fase conceitual, aplicação do método Delphi em duas rodadas e proposta de um plano de ação.

2.1 Método Delphi

Na fase conceitual, uma revisão sistemática da literatura (RSL) foi realizada utilizando o banco de dados Scopus. As palavras-chave utilizadas foram "geomateriais", "novos geomateriais", "novos materiais geotécnicos", "reforço de solo", "estabilização de solo", "melhoramento de solo", "melhoramento de rejeitos", "reforço de rejeitos" e "estabilização de rejeitos". As combinações de palavras seguidas foram: "Novos Geomateriais" e "Materiais Sustentáveis", "Reforço de Solo" e "Estabilização de Solo", "Reforço de Rejeitos" e "Estabilização de Rejeitos".

A pesquisa considerou artigos como tipo de documento, publicados em inglês de 2009 a 2023, nas seguintes áreas temáticas: engenharia, ciência dos materiais, ciência ambiental e assuntos multidisciplinares. Com base neste procedimento, 143 foram encontrados. Após uma análise detalhada, 112 artigos foram selecionados para leitura aprofundada para identificar os Fatores-Chave de Sucesso (KSFs) para o uso de NGs, categorizados em cinco grupos (Hussain et al., 2023): (1) técnicos, econômicos e financeiros; (2) socioambientais; (3) logísticos; (4) institucionais; e (5) educacionais. Esses KSFs foram a base para estruturar um questionário considerando o método Delphi, que foram apresentados para avaliação usando uma escala de Likert de 5 pontos.

O método Delphi foi escolhido devido à necessidade de julgamento especializado na investigação. Este é uma técnica de pesquisa estruturada e iterativa usada para reunir e destilar opiniões de especialistas sobre um determinado tópico ou questão. Envolve um painel de especialistas, geralmente selecionados por seu conhecimento e experiência no assunto, que fornecem contribuições anônimas através de uma série de questionários ou rodadas de comunicação. Esta abordagem permite comunicação estruturada sem a necessidade de confronto direto entre os especialistas, o que pode ajudar a evitar vieses inconscientes e garantir um consenso sobre um tema ainda não bem explorado.

Ao longo dos anos, este método tem sido principalmente utilizado para fazer previsões, identificar questões prioritárias e desenvolver estruturas. O método requer avaliação da confiabilidade e do consenso das respostas. A confiabilidade das respostas foi medida usando o alfa de Cronbach. Esta é uma medida útil para avaliar a confiabilidade interna de um instrumento de medição, como um questionário. Ajuda a determinar se os itens medem consistentemente o mesmo atributo e em que medida os resultados são confiáveis. Uma alta consistência interna é essencial para garantir que os resultados da pesquisa sejam confiáveis e consistentes. Valores acima de 0,7 são considerados altamente aceitáveis. O consenso foi medido calculando a pontuação média, desvio padrão (DP), intervalo interquartil (IQR) e mudança no DP. O consenso foi baseado em $IQR < 1$ e uma mudança negativa no DP após a segunda rodada. Portanto, os especialistas foram convidados a avaliar os KSFs na primeira rodada, o consenso foi analisado, e aqueles fatores sem consenso foram apresentados novamente aos respondentes. Os KSFs considerados relevantes tiveram um valor médio acima de 4. A convergência foi encontrada em duas rodadas. Uma vez identificados os KSFs, foi elaborado um plano de ação para destacar as ações dos envolvidos no uso de NGs.

2.2 Descrição da amostra

Os especialistas foram selecionados seguindo as diretrizes delineadas por (Rowe & Wright, 1999), com foco em uma amostra diversificada de participantes da academia, setores público e privado. Um total de sete especialistas foi escolhido, o que está dentro da faixa recomendada de 5 a 20 especialistas por (Giannarou & Zervas, 2014; von der Gracht, 2012). O processo de seleção priorizou indivíduos com conhecimento e trabalhos de pesquisa reconhecidos em NGs. O perfil dos respondentes da amostra é mostrado na Tabela 1. Todos os especialistas participaram de ambas as rodadas.

Tabela 1. Perfil dos participantes

ID	Qualificações acadêmicas	Setor de atuação	Tempo de experiência (anos)
FB	Mestrado em Engenharia de Transportes	Privado - Infraestrutura	10
JW	Doutorado em Geotecnia	Academia - Pesquisa	8
MR	Mestrado em Geotecnia	Privado - Sustentabilidade	10
NC	Doutorado em Geotecnia	Academia - Pesquisa	25
RP	Doutorado em Geotecnia	Academia - Pesquisa	10
SA	Doutorado em Arquitetura	Academia - Pesquisa	15
TD	Especialista em Engenharia Civil	Público – Transportes	12

2.1 Identificação dos fatores chave

Os Fatores-Chave de Sucesso (KSFs) identificados com base na RSL estão listados na Tabela 2. O Grupo A compreende fatores técnicos, econômicos e financeiros. Testes de campo e validações para casos

específicos, como em infraestrutura de transporte, foram considerados altamente relevantes para comprovar e promover a aplicação desses materiais. Além disso, análises de custo-benefício que consideram aspectos quantitativos, bem como socioambientais, também foram consideradas altamente importantes. A realização dessas análises em paralelo a estudos de caso permitiria a obtenção de indicadores de monitoramento de maneira mais controlada e eficiente (Ardito et al., 2019; Barreto et al., 2022; Consoli, Faro, et al., 2017; de Araujo Carneiro & Dal Toé Casagrande, 2020; Ferreira et al., 2022; Mishra et al., 2022; Santhikala et al., 2022; Servi et al., 2022).

O Grupo B inclui os aspectos socioambientais, que discutem questões globais-chave nos próximos anos, especialmente considerando os efeitos das mudanças climáticas, incluindo a descarbonização e a criação de estruturas mais resilientes. Além disso, o potencial de distribuição desses materiais para comunidades desfavorecidas como uma solução econômica para a construção de estruturas mais seguras também foi avaliado (Al-Bared et al., 2018; Consoli et al., 2021; Consoli, Marques, et al., 2017; Munirwan et al., 2022; Rahman et al., 2020; Tonini de Araújo et al., 2021).

O Grupo C inclui os aspectos logísticos. O uso de materiais locais é o item mais relevante, especialmente quando se considera o contexto brasileiro. É um aspecto crucial que promove soluções sustentáveis em um país com geologia diversificada. O uso de materiais locais apresenta inúmeras oportunidades, tais como: (i) redução das distâncias de transporte, o que leva a menores emissões de gases de efeito estufa; (ii) criação de oportunidades para mão de obra qualificada local, impulsionando a economia regional; (iii) utilização de resíduos e materiais não convencionais abundantes na região; e (iv) desenvolvimento de técnicas de orçamentação e diretrizes adaptadas ao contexto local (Al-Bared et al., 2018; Carvalho et al., 2019; Kyrddoda et al., 2023).

O Grupo D inclui os aspectos institucionais, que visam identificar as responsabilidades dos diferentes *stakeholders*, incluindo organizações multilaterais e internacionais, governos e instituições públicas. Por fim, o Grupo E inclui os aspectos educacionais, que visam avaliar os KSFs relacionados à disseminação do conhecimento sobre os NGs. Não foram encontradas referências relevantes na literatura para os dois últimos grupos. Sua formulação foi baseada na experiência dos autores (Ardito et al., 2019; da Rocha et al., 2016, 2022; Gravina da Rocha et al., 2022).

Tabela 2. KSFs identificados na literatura.

Group	KSFs
A	A1: Validação técnica do ponto de vista mecânico
	A2: Validação técnica do ponto de vista hidráulico
	A3: Validação técnica por meio de ensaios de campo
	A4: Validação técnica para aplicações específicas
	A5: Avaliação experimental considerando aspectos de contaminação
	A6: Colaboração entre governos e universidades para o desenvolvimento de pesquisa aplicada
	A7: Verificação do custo-benefício por meio de análises quantitativas
	A8: Verificação do custo-benefício por meio de análises socioambientais
	A9: Baixa complexidade de implementação
	A10: Informação técnica clara, concisa e acessível sobre as vantagens de aplicação de novos geomateriais em comparação com as soluções tradicionais
B	A11: Promoção de soluções sustentáveis adequadas ao contexto regional
	B1: Desenvolvimento de materiais mais resilientes aos efeitos da mudança do clima
	B2: Desenvolvimento de materiais que usam resíduos como reforço ou matriz
	B3: Desenvolvimento de materiais que proponha a descarbonização
	B4: Condução de análise de ciclo de vida para verificação dos impactos ambientais e da pegada de carbono
	B5: Compatibilidade com os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS)
	B6: Compatibilidade com as contribuições nacionalmente determinadas (NDCs)
	B7: Desenvolvimento de materiais e técnicas que estimulam o desenvolvimento regional
	B8: Desenvolvimento de materiais que geram menos poluentes
B9: Desenvolvimento de materiais que geram menos resíduos sólidos	

	B10: Políticas públicas que proponham a distribuição de novos geomateriais para a população vulnerável		públicas em nível federal para o desenvolvimento de novos materiais geotécnicos	
C	C1: Desenvolvimento de soluções que utilizam materiais locais		D3: Projetos de promoção de instituições públicas em nível estadual para o desenvolvimento de novos materiais geotécnicos	
	C2: Análise da oferta de materiais		D4: Projetos de promoção de instituições públicas em nível municipal para o desenvolvimento de novos materiais geotécnicos	
	C3: Análise da demanda de materiais		D5: Desenvolvimento de materiais de conhecimento por organizações internacionais sobre o assunto	
	C4: Verificação da disponibilidade de infraestrutura aplicação dos materiais		D6: Uso obrigatório de novos materiais geotécnicos estabelecidos por autoridades governamentais	
	C5: Incentivos financeiros e fiscais concedidos para o uso de resíduos industriais na construção		E	E1: Desenvolvimento de materiais de conhecimento em português
	C6: Planejamento logístico para distribuição de materiais para uso em construção civil			E2: Cursos, palestras, workshops em parceria com entidades públicas
	C7: Planejamento logístico para armazenamento de materiais para uso em construção civil			D3: Cursos, palestras, workshops para alunos de graduação sobre novos materiais geotécnicos
D	D1: Projetos de promoção de organizações multilaterais para pesquisa e desenvolvimento de novos materiais geotécnicos			
	D2: Projetos de promoção de instituições			

3 RESULTADOS

O método Delphi foi então aplicado aos especialistas selecionados por meio de um questionário estruturado apresentado na seção anterior. Foram realizadas duas rodadas para estabelecer critérios de convergência, e todos os especialistas participaram de ambas as rodadas. Todas as respostas foram consideradas confiáveis, com valores de alfa de Cronbach sendo 0,895 e 0,778 para a primeira e segunda rodadas, respectivamente. A próxima subseção detalha os resultados dos grupos.

Todos os aspectos deste grupo dos aspectos técnicos, econômicos e financeiros, exceto a complexidade de implementação, foram identificados como relevantes pelos especialistas. Eles consideraram a verificação mecânica mais importante do que a verificação hidráulica, já que esta última seria necessária apenas para aplicações relacionadas ao fluxo. Testes mecânicos foram identificados como a primeira validação necessária para os novos geomateriais. Desenvolver soluções adequadas para o contexto regional é um aspecto crucial, e recebeu uma pontuação média de 4,43, tornando-o altamente relevante. Para alcançar isso, ter acesso a informações claras também foi considerado essencial, com uma pontuação média de 4,29.

Com relação aos aspectos socioambientais, os fatores mais significativos estão relacionados à utilização de resíduos para o desenvolvimento de novos materiais e à realização de uma análise do ciclo de vida para minimizar a geração de poluentes e emissões de gases de efeito estufa. A análise do ciclo de vida tornou-se uma prática predominante no âmbito dos materiais emergentes, com o objetivo de avaliar toda a cadeia de produção. No entanto, as referências na literatura ainda indicam uma lacuna de conhecimento em relação a esse tipo de análise e uma falta de padronização, resultando em ambiguidade e dificuldade na comparação de soluções.

Quatro itens não alcançaram consenso entre os entrevistados, a saber: (1) o desenvolvimento de materiais mais resistentes aos efeitos das mudanças climáticas; (2) compatibilidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas; (3) compatibilidade com as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs); e (4) a necessidade de políticas públicas para distribuir novos materiais geotécnicos para populações vulneráveis. Os autores observaram que superar a lacuna entre o debate climático global e a indústria continua sendo um desafio, o que pode explicar a situação atual. Portanto, estudos científicos que destacam a importância dos NGs na mitigação dos efeitos do aquecimento global são cruciais.

Os aspectos logísticos foram avaliados para determinar a importância do fornecimento e da demanda na seleção dos NGs. Além disso, a utilização de materiais locais e o planejamento logístico para armazenamento e distribuição também foram discutidos. Durante a primeira rodada, dois itens não alcançaram consenso: um dizia respeito à análise de demanda e o outro relacionava-se à necessidade de incentivos financeiros e fiscais para promover o uso de resíduos como materiais de construção. Os itens considerados de menor importância pelos especialistas estavam relacionados aos planos de distribuição logística e armazenamento.

O KSF com a média mais alta neste no grupo dos aspectos institucionais refere-se à participação das instituições em nível federal, o que é de fato essencial no contexto brasileiro. O órgão governamental responsável pela infraestrutura de transporte, por exemplo, também normaliza materiais e serviços de engenharia. Além disso, controla e orienta contratos com o setor privado que gerencia alguns ativos da infraestrutura brasileira.

No nível do governo municipal, pode haver susceptibilidade à desvio dos objetivos gerais e à dispersão de esforços quando a comunidade carece de um foco unificado, uma visão coerente e metas bem definidas. No entanto, os gestores do governo local frequentemente assumem um papel crucial na identificação de desafios de tomada de decisão e estimulam os órgãos governantes a empreender iniciativas de autoavaliação e aprimoramento. Os itens considerados menos relevantes pelos especialistas estavam relacionados à promoção de projetos no nível municipal com o uso obrigatório de novos materiais geotécnicos. Em outras palavras, projetos que já estão planejados, licitados e executados levando em consideração os NGs. Além disso, o uso de materiais endossados por organizações internacionais foi de menor significância, pois os especialistas acreditavam que outras instituições têm maior alcance entre os municípios locais.

Sobre os aspectos educacionais, destaca-se a importância do desenvolvimento de materiais de treinamento em português. O Brasil possui uma área continental com diferentes níveis de desenvolvimento socioeconômico, o que significa que apenas parte da população pode entender um idioma estrangeiro. Para garantir uma aplicação mais acessível desses materiais, especialmente em municípios pequenos e médios, materiais educacionais em português são considerados essenciais para a aplicação dessas soluções inovadoras. Todos os aspectos educacionais alcançaram consenso na primeira rodada, com altos valores médios. Notavelmente, os entrevistados consideraram o treinamento de estudantes de engenharia tão importante quanto o treinamento de trabalhadores por meio de parcerias com instituições públicas.

4 CONCLUSÕES

Os Novos Geomateriais (NGs) desempenham um papel crucial no compromisso com a descarbonização e a sustentabilidade. No Brasil, a identificação dos principais fatores de sucesso (KSFs) para projetos de NG em larga escala foi conduzida utilizando o método Delphi. As seguintes conclusões podem ser tiradas do estudo:

Evidências técnicas, análises de custo-benefício e o desenvolvimento de soluções específicas para o contexto são fundamentais para a implementação bem-sucedida dos NGs. É essencial ter evidências científicas sólidas que apoiem a eficácia desses materiais e avaliar sua viabilidade econômica no contexto regional dado. Considerações socioambientais são cruciais na adoção dos NGs. Isso envolve a utilização de materiais residuais para o desenvolvimento de novas soluções, a realização de análises de ciclo de vida para minimizar a poluição e as emissões de gases de efeito estufa, e a promoção do uso de recursos disponíveis localmente. Além disso, é imperativo que organizações multilaterais e instituições públicas em nível federal apoiem ativamente as iniciativas de NG. Além disso, investir na formação e educação de estudantes de engenharia e trabalhadores no campo dos NGs é essencial para sua implementação bem-sucedida.

De modo geral, a utilização de materiais de engenharia locais e o avanço de novas tecnologias não apenas impulsionam o crescimento econômico, mas também contribuem para o progresso social. Ao capacitar comunidades com recursos e soluções inovadoras, o tecido social é fortalecido, promovendo um senso de propriedade, orgulho e resiliência.

Vale ressaltar que nem todos os aspectos alcançaram um consenso entre os entrevistados. Algumas áreas que requerem mais atenção incluem o desenvolvimento de materiais mais resistentes aos efeitos das mudanças climáticas, garantindo a compatibilidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a necessidade de políticas públicas que facilitem a distribuição de novos materiais geotécnicos para populações vulneráveis.

O estudo, apesar de pioneiro, reconhece suas limitações inerentes. As percepções apresentadas estão intrinsecamente fundamentadas na realidade brasileira, exigindo cautela ao extrapolar os resultados para contextos diversos. Além disso, como uma incursão inaugural neste campo, a presente pesquisa representa uma exploração preliminar, posicionada para expansão em investigações subsequentes. Recomendações ditam que estudos futuros se envolvam na validação do *roadmap* proposto por meio de estudos de caso concretos, reforçando assim sua aplicabilidade prática.

Esta pesquisa traz inovação ao identificar os principais fatores que impulsionam o uso de novos materiais geotécnicos em situações do mundo real. Esse feito foi possível por meio de um método estatístico robusto. Enquanto os esforços acadêmicos têm contribuído significativamente para o desenvolvimento de novos materiais, ainda há muito a explorar em estudos maiores que considerem os efeitos ambientais e econômicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Bared, M. A. M., Marto, A., & Latifi, N. (2018). Utilization of Recycled Tiles and Tyres in Stabilization of Soils and Production of Construction Materials – A State-of-the-Art Review. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 22(10), Artigo 10. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1532-2>
- Ardito, L., Ferraris, A., Messeni Petruzzelli, A., Bresciani, S., & Del Giudice, M. (2019). The role of universities in the knowledge management of smart city projects. *Technological Forecasting and Social Change*, 142, 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.07.030>
- Barreto, T., Repsold, L., Souza e Silva, N., & Casagrande, M. (2022). Influence of addition of butadiene copolymer and modified styrene on the mechanical behavior of a sand. *Soils and Rocks*, 45(2), Artigo 2. <https://doi.org/10.28927/SR.2022.074521>
- Carvalho, B., Casagrande, M., & Farias, M. (2019). Evaluation of resilient behavior of a clayey soil with polyethylene terephthalate (PET) insertion for application in pavements base. *E3S Web of Conferences*, 92, 12006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199212006>
- Consoli, N. C., Faro, V. P., Schnaid, F., Born, R. B., & Carretta, M. da S. (2017). Crosswise-loaded short and long piles in artificially cemented top sand layers embedded in lightly bonded residual soil. *Soils and Foundations*, 57(6), Artigo 6. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.08.022>
- Consoli, N. C., Festugato, L., Miguel, G. D., Moreira, E. B., & Scheuermann Filho, H. C. (2021). Fatigue Life of Green Stabilized Fiber-Reinforced Sulfate-Rich Dispersive Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(9), Artigo 9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003842](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003842)
- Consoli, N. C., Marques, S. F. V., Floss, M. F., & Festugato, L. (2017). Broad-Spectrum Empirical Correlation Determining Tensile and Compressive Strength of Cement-Bonded Clean Granular Soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6), Artigo 6. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001858](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001858)
- da Rocha, C. G., Passuello, A., Consoli, N. C., Quiñónez Samaniego, R. A., & Kanazawa, N. M. (2016). Life cycle assessment for soil stabilization dosages: A study for the Paraguayan Chaco. *Journal of Cleaner Production*, 139, 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.219>
- da Rocha, C. G., Saldanha, R. B., Tonini de Araújo, M., & Consoli, N. C. (2022). Social and environmental assessments of Eco-friendly Pavement alternatives. *Construction and Building Materials*, 325, 126736. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126736>
- de Araujo Carneiro, A., & Dal Toé Casagrande, M. (2020). Mechanical and environmental performance of polymer stabilized iron ore tailings. *Soils and Rocks*, 43(4), Artigo 4. <https://doi.org/10.28927/SR.434679>
- Ferreira, J. W. D. S., Marroquin, J. F. R., Felix, J. F., Farias, M. M., & Casagrande, M. D. T. (2022). The feasibility of recycled micro polyethylene terephthalate (PET) replacing natural sand in hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 330, 127276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127276>
- Gao, H., Liu, J., & Liu, H. (2011). Geotechnical properties of EPS composite soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 5(1), Artigo 1. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2011.05.01.69-77>
- Giannarou, L., & Zervas, E. (2014). Using Delphi technique to build consensus in practice. *International Journal of Business Science and Applied Management*, 9, 65–82.

- Gravina da Rocha, C., Marin, E. J. B., Quiñónez Samaniego, R. A., & Consoli, N. C. (2021). Decision-Making Model for Soil Stabilization: Minimizing Cost and Environmental Impacts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(2), Artigo 2. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003551](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003551)
- Han, J., & Thakur, J. K. (2015). Sustainable roadway construction using recycled aggregates with geosynthetics. *Sustainable Cities and Society*, 14, 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.11.011>
- Hussain, S., Ahonen, V., Karasu, T., & Leviäkangas, P. (2023). Sustainability of smart rural mobility and tourism: A key performance indicators-based approach. *Technology in Society*, 74, 102287. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102287>
- Koohmishi, M., & Palassi, M. (2022). Mechanical Properties of Clayey Soil Reinforced with PET Considering the Influence of Lime-Stabilization. *Transportation Geotechnics*, 33, 100726. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100726>
- Kyrdoda, Y., Balzano, M., & Marzi, G. (2023). Learn to survive crises: The role of firm resilience, innovation capabilities and environmental dynamism. *Technology in Society*, 74, 102285. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102285>
- Liu, X. (2018). Response of Sandy Soil Stabilized by Polymer Additives. *Open Access Journal of Environmental and Soil Sciences*, 1(3). <https://doi.org/10.32474/OAJESS.2018.01.000112>
- Mishra, P., Shukla, S., & Mittal, A. (2022). Stabilization of subgrade with expansive soil using agricultural and industrial By-products: A review. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1418–1424. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.397>
- Munirwan, R. P., Mohd Taib, A., Taha, M. R., Abd Rahman, N., & Munirwansyah, M. (2022). Utilization of coffee husk ash for soil stabilization: A systematic review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103252. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103252>
- Rahman, M. M., Hora, R. N., Ahenkorah, I., Beecham, S., Karim, M. R., & Iqbal, A. (2020). State-of-the-Art Review of Microbial-Induced Calcite Precipitation and Its Sustainability in Engineering Applications. *Sustainability*, 12(15), Artigo 15. <https://doi.org/10.3390/su12156281>
- Rowe, G., & Wright, G. (1999). The Delphi technique as a forecasting tool: Issues and analysis. *International Journal of Forecasting*, 15(4), Artigo 4. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(99\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(99)00018-7)
- Santhikala, R., Chandramouli, K., & Pannirselvam, N. (2022). Stabilization of expansive soil using flyash based geopolymer. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.006>
- Servi, S., Lotero, A., Silva, J. P. S., Bastos, C., & Consoli, N. C. (2022). Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking. *Construction and Building Materials*, 349, 128770. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128770>
- Sinoh, S. S., Othman, F., & Onn, C. C. (2023). Circular economy potential of sustainable aggregates for the Malaysian construction industry. *Sustainable Cities and Society*, 89, 104332. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104332>
- Tonini de Araújo, M., Tonatto Ferrazzo, S., Jordi Bruschi, G. J., & Consoli, N. C. (2021). Mechanical and Environmental Performance of Eggshell Lime for Expansive Soils Improvement. *Transportation Geotechnics*, 31, 100681. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100681>
- von der Gracht, H. A. (2012). Consensus measurement in Delphi studies: Review and implications for future quality assurance. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(8), Artigo 8. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.04.013>