LIMITES DA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE SOLOS LATERÍTICOS DE ALTA PLASTICIDADE EM BASES DE PAVIMENTOS: CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA A ADOÇÃO DE BRITA GRADUADA NA BR-210/RR

LIMITATIONS OF GRADATION STABILIZATION OF HIGH-PLASTICITY LATERITIC SOILS IN PAVEMENT BASES: TECHNICAL CRITERIA FOR THE ADOPTION OF GRADED CRUSHED STONE ON BR-210/RR

LÍMITES DE LA ESTABILIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE SUELOS LATERÍTICOS ALTAMENTE PLÁSTICOS EN BASES DE PAVIMENTOS: CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA ADOPCIÓN DE PIEDRA TRITURADA GRADUADA EN BR-210/RR

10.56238/IIMultiCientifica-143

Almira Mary Cordeiro de Araujo
Mestre em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília

RESUMO
A estabilização granulométrica de solos tropicais é uma alternativa recorrente na pavimentação brasileira, sobretudo em regiões onde a disponibilidade de materiais naturais condiciona as soluções de projeto. Entretanto, a simples redução do índice de plasticidade por adição de areia não assegura, de forma isolada, desempenho adequado para uma camada de base. Este artigo analisa os limites técnicos da correção granulométrica de solos lateríticos de elevada plasticidade e discute os critérios que podem justificar a substituição da mistura solo-areia por uma base predominantemente pétrea, como a brita graduada simples (BGS), tomando como referência uma situação relatada em trecho da BR-210, em Roraima, na qual uma mistura com 35% de areia permaneceu com índice de plasticidade de 12%. O método adotado foi revisão bibliográfica, com priorização de publicações brasileiras de 2021 a 2026, normas vigentes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes e material técnico recente da Universidade Federal do Ceará. A análise mostra que o aumento do teor arenoso tende a reduzir a plasticidade, mas pode apresentar teor ótimo do ponto de vista mecânico, de modo que o CBR/ISC não cresce indefinidamente com a incorporação de areia. A DNIT 141/2022-ES, aplicável à base estabilizada granulometricamente, adota como referência empírica índice de plasticidade de até 6%, além de requisitos de ISC, expansão e limite de liquidez, admitindo equivalente de areia superior a 30% quando os limites de liquidez e plasticidade forem ultrapassados. Conclui-se que a adoção de BGS pode ser tecnicamente fundamentada quando a dosagem solo-areia não produz, em conjunto, plasticidade, suporte, estabilidade e comportamento mecânico compatíveis com o projeto, desde que a decisão esteja apoiada em ensaios, controle tecnológico e registro de campo.

Palavras-chave: Solos Lateríticos. Estabilização Granulométrica. Índice de Plasticidade. CBR. Brita Graduada Simples.

ABSTRACT
Grading stabilization of tropical soils is a common practice in Brazilian pavement engineering, particularly in regions where the availability of natural materials dictates design solutions. However, simply reducing the plasticity index by adding sand does not, in isolation, guarantee adequate performance for a base layer. This article analyzes the technical limitations of grading correction for high-plasticity lateritic soils and discusses criteria justifying the replacement of soil-sand mixtures with

predominantly granular bases—such as simple graded crushed stone (BGS)—using a case study from a section of the BR-210 highway in Roraima as a reference; in that instance, a mixture containing 35% sand retained a plasticity index of 12%. The study employed a literature review, prioritizing Brazilian publications from 2021 to 2026, current standards from the National Department of Transport Infrastructure (DNIT), and recent technical material from the Federal University of Ceará. The analysis indicates that while increasing sand content tends to reduce plasticity, there is an optimal sand content from a mechanical standpoint, meaning the CBR value does not increase indefinitely with the addition of sand. DNIT standard 141/2022-ES, applicable to grading-stabilized bases, adopts an empirical reference plasticity index of up to 6%—alongside requirements for CBR, expansion, and liquid limit—while allowing for a sand equivalent greater than 30% when liquid limit and plasticity limits are exceeded. The study concludes that the use of BGS can be technically justified when soil-sand proportioning fails to yield a combination of plasticity, bearing capacity, stability, and mechanical behavior compatible with design requirements, provided the decision is supported by laboratory testing, quality control, and field records.

Keywords: Lateritic Soils. Grading Stabilization. Plasticity Index. CBR. Simple Graded Crushed Stone.

RESUMEN

La estabilización granulométrica de suelos tropicales es una alternativa recurrente en la pavimentación brasileña, especialmente en regiones donde la disponibilidad de materiales naturales condiciona las soluciones de diseño. Sin embargo, la simple reducción del índice de plasticidad mediante la adición de arena no garantiza, por sí sola, un rendimiento adecuado para una capa base. Este artículo analiza los límites técnicos de la corrección granulométrica de suelos lateríticos altamente plásticos y discute los criterios que justifican la sustitución de la mezcla suelo-arena por una base predominantemente pedregosa, como la piedra triturada graduada simple (BGS), tomando como referencia un caso reportado en un tramo de la carretera BR-210 en Roraima, donde una mezcla con un 35% de arena mantuvo un índice de plasticidad del 12%. El método empleado fue una revisión bibliográfica, priorizando publicaciones brasileñas de 2021 a 2026, normas vigentes del Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte y material técnico reciente de la Universidad Federal de Ceará. El análisis muestra que el aumento del contenido de arena tiende a reducir la plasticidad, pero puede presentar un contenido óptimo desde el punto de vista mecánico, de modo que el CBR/ISC no aumente indefinidamente con la incorporación de arena. La DNIT 141/2022-ES, aplicable a bases estabilizadas granulométricamente, adopta como referencia empírica un índice de plasticidad de hasta el 6%, además de los requisitos de ISC, expansión y límite líquido, admitiendo un equivalente de arena superior al 30% cuando se superan los límites líquido y plástico. Se concluye que la adopción de BGS (Estabilización de Arena en Borde) puede justificarse técnicamente cuando la mezcla suelo-arena no produce, en conjunto, plasticidad, soporte, estabilidad y comportamiento mecánico compatibles con el proyecto, siempre que la decisión esté respaldada por ensayos, control tecnológico y registros de campo.

Palabras clave: Suelos Lateríticos. Estabilización Granulométrica. Índice de Plasticidad. CBR. Agregado de Granulometría Simple.

1 INTRODUÇÃO

A base de um pavimento flexível ocupa posição decisiva na distribuição das tensões geradas pelo tráfego. Em regiões tropicais, essa função é frequentemente atribuída a solos locais, misturas solo-agregado ou materiais pétreos graduados, porque a escolha do material precisa conciliar comportamento mecânico, disponibilidade regional, distância de transporte, variabilidade de jazidas e condições de execução. O problema se torna mais sensível quando o solo disponível é laterítico e apresenta elevada plasticidade. Nessa situação, uma alternativa clássica consiste em alterar a composição granulométrica pela incorporação de areia ou de agregado, buscando reduzir a influência da fração fina e produzir uma mistura mais estável. A literatura recente, contudo, reforça que a aptidão de solos tropicais não deve ser julgada por um único índice, pois o comportamento resulta da gênese, da estrutura, da umidade, do estado de compactação e da resposta às cargas repetidas (Araújo e Farias *et al.*, 2025; Sousa, 2021).

A questão central deste trabalho nasce justamente da diferença entre “reduzir plasticidade” e “produzir uma base adequada”. Em uma situação técnica informada para trecho da BR-210, em Roraima, foi testada uma correção do solo com 35% de areia, mas o índice de plasticidade permaneceu em 12%. Esse valor é superior ao limite empírico de 6% previsto pela DNIT 141/2022-ES para base estabilizada granulometricamente. Ao mesmo tempo, aumentar indefinidamente a quantidade de areia apenas para perseguir um menor índice de plasticidade pode modificar o arranjo entre os grãos, reduzir a contribuição coesiva da matriz e, em determinados materiais, levar à perda do suporte medido pelo Índice de Suporte Califórnia - ISC, usualmente referido como CBR. Estudos com diferentes materiais granulares e solos estabilizados confirmam que a resposta mecânica depende da proporção dos componentes e que a existência de um teor ótimo precisa ser verificada experimentalmente (Almeida *et al.*, 2021; Valoura; Silva; Furlan, 2022; Fajardo *et al.*, 2026).

Um ponto relevante para a consistência normativa é a identificação correta da especificação aplicável. A DNIT 142/2022-ES trata de base de solo melhorado com cimento, enquanto a base estabilizada granulometricamente é disciplinada pela DNIT 141/2022-ES. A distinção não é apenas nominal: os processos de estabilização, os mecanismos de ganho de desempenho e os controles são diferentes. Na estabilização granulométrica, a melhoria resulta da combinação física de solos, materiais granulares ou agregados; na base melhorada com cimento, existe também um ligante hidráulico e procedimentos específicos de dosagem, cura e controle. Portanto, uma análise voltada à adição de areia

e à alternativa por BGS deve tomar a DNIT 141/2022-ES como referência principal (DNIT, 2022a; DNIT, 2022b).

O material técnico fornecido pela professora Suelly Helena de Araújo Barroso, da Universidade Federal do Ceará, é particularmente útil para discutir essa questão. Em conteúdo recente sobre solos tropicais e dimensionamento de pavimentos, a estabilização granulométrica com areia de rio é apresentada como combinação de materiais em proporções adequadas para melhorar as características do solo de origem. A mesma lâmina reproduz uma série experimental histórica em que o aumento da fração de areia reduz os limites de Atterberg, mas o CBR cresce até determinado teor e depois diminui. Essa representação é importante porque desmonta a interpretação linear de que mais areia sempre significará uma base melhor. O efeito favorável sobre a plasticidade pode coexistir com uma perda de capacidade de suporte quando a dosagem ultrapassa a faixa mecanicamente mais eficiente (Barroso, 2024).

Além do CBR/ISC, o cenário contemporâneo da pavimentação brasileira valoriza parâmetros de resposta mecânica, como módulo de resiliência e deformação permanente. Bona e Guimarães (2021) demonstraram, em uma laterita da BR-163/PA, que um material pode apresentar CBR abaixo do critério tradicional e ainda assim ter comportamento favorável em ensaios mecanísticos. Cabral, Barroso e Silva (2021) também destacam a importância do módulo de resiliência e da deformação permanente para avaliar materiais de pavimentação. Isso não torna os critérios empíricos irrelevantes; antes, mostra que uma decisão tecnicamente sólida deve reunir diferentes evidências e observar o método de dimensionamento efetivamente adotado no projeto.

Diante desse contexto, o objetivo central do artigo é analisar, por revisão bibliográfica, os limites da estabilização granulométrica por adição de areia em solos lateríticos de alta plasticidade e os critérios técnicos que podem fundamentar a adoção de uma solução com brita graduada simples na camada de base. Como objetivos específicos, busca-se: discutir as particularidades de solos tropicais; examinar a relação entre teor de areia, plasticidade e CBR/ISC; apresentar os requisitos atuais da DNIT 141/2022-ES; diferenciar essa norma da DNIT 142/2022-ES; e interpretar, sem transformar o trabalho em perícia, a coerência técnica da opção por BGS quando a mistura solo-areia permanece plástica ou perde desempenho mecânico. O conhecimento acadêmico pretendido é organizar uma argumentação verificável, baseada em normas e evidências laboratoriais, capaz de demonstrar por que a dosagem de um estabilizante granular deve ser orientada pelo desempenho global da mistura e não por um único índice.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo foi desenvolvido sob abordagem qualitativa, com finalidade descritiva e exploratória, adotando como procedimentos a pesquisa bibliográfica e a análise documental. Quanto ao tipo de revisão, trata-se de revisão narrativa de caráter técnico. O recorte temporal principal compreendeu publicações de 2021 a 2026. A identificação das fontes foi realizada no Portal de Periódicos CAPES, SciELO Brasil, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD/IBICT), Google Acadêmico, repositórios institucionais da Universidade Federal do Ceará e da Universidade Federal de Pernambuco e portal oficial do DNIT/IPR. Foram utilizados, de forma isolada e combinada, os descritores "solo laterítico", "estabilização granulométrica", "solo-agregado", "índice de plasticidade", "CBR", "ISC", "módulo de resiliência", "deformação permanente", "base granular" e "pavimentos rodoviários".

Como critérios de inclusão, foram considerados trabalhos de 2021 a 2026, com texto completo disponível, produzidos em contexto brasileiro ou por instituições brasileiras e relacionados a solos tropicais, estabilização granulométrica, misturas solo-agregado, propriedades de materiais de base ou critérios normativos de pavimentação. Também foram admitidos documentos oficiais vigentes do DNIT e o material técnico de Barroso (2024), por sua relação direta com a curva de plasticidade e CBR analisada. Foram excluídos registros duplicados, resumos sem texto integral, publicações sem relação com camadas de base ou dosagem granulométrica, documentos normativos substituídos sem utilidade comparativa e estudos sem informações suficientes sobre materiais, ensaios ou resultados. A seleção ocorreu em cinco etapas: identificação das publicações; triagem por título e resumo; leitura integral; extração de autor, ano, material, proporções, ensaios e resultados; e síntese temática confrontada com as normas. A análise respondeu a quatro questões: como a composição granulométrica interfere na resposta do solo; por que materiais tropicais exigem interpretação compatível com sua gênese; quais propriedades mecânicas devem acompanhar os índices físicos; e como a norma vigente enquadra bases estabilizadas granulometricamente.

Como documento normativo central foi utilizada a DNIT 141/2022-ES, que estabelece os requisitos para base estabilizada granulometricamente. A DNIT 142/2022-ES foi consultada somente para delimitar que sua aplicação está associada ao solo melhorado com cimento. Também foram examinados documentos recentes do DNIT relativos à classificação de solos tropicais, a ensaios em corpos de prova miniatura e à execução de segmentos experimentais. Na etapa de análise, os resultados

das publicações selecionadas foram agrupados conforme os objetivos específicos do artigo e comparados com os critérios técnicos das normas vigentes. A situação da BR-210 foi interpretada exclusivamente a partir da informação técnica disponibilizada pela autora deste TCC — mistura com 35% de areia e índice de plasticidade de 12% —, sem atribuir ao trecho valores de CBR/ISC, módulo de resiliência, deformação permanente, equivalente de areia ou expansão que não tenham sido fornecidos. Essa delimitação preserva o caráter bibliográfico e documental do estudo e evita transformar a revisão em laudo pericial.

2.2 SOLOS LATERÍTICOS, PLASTICIDADE E A NECESSIDADE DE AVALIAÇÃO COMPATÍVEL COM O MEIO TROPICAL

Os solos lateríticos se formam sob intenso intemperismo em ambientes tropicais e podem apresentar comportamento que não é adequadamente previsto apenas por sistemas classificatórios desenvolvidos para outros contextos climáticos. Araújo e Farias *et al.* (2025) compararam métodos de classificação aplicados a solos tropicais e destacaram a utilidade das abordagens MCT e G-MCT para aproximar a classificação do comportamento observado em pavimentos. Farias, Araújo e Rodrigues (2023) chegam a conclusão semelhante ao examinar a aplicabilidade de sistema de classificação voltado a solos lateríticos. Em termos práticos, isso significa que “solo argiloso” ou “IP elevado” não são rótulos suficientes para antecipar, sozinhos, todo o desempenho da camada.

O índice de plasticidade expressa a faixa de umidade na qual a fração fina apresenta comportamento plástico. Valores elevados normalmente indicam maior participação de finos ativos e maior sensibilidade da consistência à água. Em uma base de pavimento, esse aspecto é relevante porque variações de umidade podem alterar a rigidez e favorecer deformações. Entretanto, solos lateríticos apresentam estrutura e mineralogia específicas, de modo que a relação entre índices de Atterberg e desempenho mecânico não é universal. Sousa (2021) mostra a necessidade de complementar classificações tradicionais com métodos e ensaios mais aderentes aos solos tropicais, enquanto Santos, Silva e Guimarães (2022) ressaltam a importância da qualidade metrológica na determinação da deformação permanente desses materiais.

A própria evolução das normas brasileiras reforça essa leitura. Em 2023, o DNIT publicou procedimentos atualizados para classificação de solos finos tropicais e de solos tropicais de granulação grossa, além de métodos miniatura para compactação e Mini-CBR. A DNIT 259/2023-CLA explicita que a norma “estabelece a classificação de solos finos tropicais, com base na metodologia MCT

(Miniatura, Compactado, Tropical)" (DNIT, 2023b, p. 1). Esses documentos não substituem os requisitos específicos de uma camada de base, mas ampliam as ferramentas disponíveis para compreender materiais locais. A classificação, portanto, deve funcionar como etapa de interpretação e seleção, não como substituto da dosagem e do controle de desempenho (DNIT, 2023a; DNIT, 2023b; DNIT, 2023c).

Outro aspecto decisivo é a resposta às cargas repetidas. Bona e Guimarães (2021) analisaram uma laterita utilizada em trecho da BR-163/PA e observaram excelente comportamento de módulo resiliente e deformação permanente, apesar de o CBR ter ficado abaixo do mínimo de uma especificação então empregada. Cabral, Barroso e Silva (2021) argumentam que a avaliação mecanístico-empírica, com MR e DP, permite compreender melhor a contribuição estrutural de solos e materiais granulares. Araújo (2023), ao investigar a deformação permanente em solos do Ceará, também demonstra que o comportamento plástico ao longo de milhares de ciclos fornece informações que não aparecem em um ensaio estático isolado. Esses resultados são relevantes para este TCC porque sustentam uma ideia essencial: nenhum índice deve ser interpretado fora do conjunto de critérios do projeto.

2.3 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA COM AREIA: BENEFÍCIOS E LIMITES DE DOSAGEM

A estabilização granulométrica é um processo físico de melhoria. A DNIT 141/2022-ES a define como "processo de melhoria das características de solos 'in natura' mediante a adição de um ou mais materiais, de forma a se obter uma mistura final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade" (DNIT, 2022a, p. 3). Esse conceito exige que a combinação realmente proporcione melhoria substancial em relação ao solo original. Assim, acrescentar areia não constitui, por si só, prova de estabilização satisfatória: é necessário demonstrar que o produto final se tornou mais apropriado à função estrutural para a qual foi dosado.

Quando areia é incorporada a um solo com elevada fração fina, uma consequência esperada é a diluição relativa dos finos e a redução dos índices de consistência. A mudança também interfere no arranjo interno da mistura. Em teores intermediários, partículas mais grossas podem participar de um esqueleto granular enquanto os finos ocupam parte dos vazios, produzindo maior densidade e boa resistência. Quando a fração arenosa cresce além do equilíbrio adequado, porém, a mistura pode perder parcela da coesão aparente e mudar o mecanismo de compactação. O comportamento final depende da

granulometria da areia, da natureza da argila, da energia e umidade de compactação e da distribuição dos vazios.

Almeida *et al.* (2021), estudando misturas de solo e RAP em diferentes proporções, encontraram resposta dependente do teor do material granular e identificaram uma faixa ótima entre dosagens avaliadas, em vez de crescimento ilimitado do desempenho. Embora RAP não seja areia de rio, o princípio de dosagem é comparável: a incorporação de uma fração granular altera simultaneamente granulometria, coesão, umidade ótima e resistência. Almeida, Sales e Cavalcante (2024) observaram que a inclusão de material fresado reduziu plasticidade e expansão e aumentou o índice de suporte em determinadas composições, mas a plasticidade ainda foi um impedimento relevante para enquadramento normativo de algumas misturas. Fajardo *et al.* (2026), com solo laterítico argiloso e RAP, identificaram melhor equilíbrio mecânico em uma proporção intermediária, reforçando que o teor ótimo precisa ser determinado para cada conjunto de materiais.

Os trabalhos de Santos *et al.* (2024) e Valoura, Silva e Furlan (2022) ajudam a ampliar essa interpretação. Ambos analisam camadas granulares ou misturas solo-agregado com foco em propriedades mecânicas e comportamento estrutural, evidenciando que a resposta varia com a composição e as condições de ensaio. A relevância desses estudos para uma mistura solo-areia está menos no tipo específico de agregado e mais no método de raciocínio: materiais granulometricamente modificados precisam ser comparados por ensaios que representem suas propriedades físicas e mecânicas, e não apenas por uma expectativa genérica de melhoria.

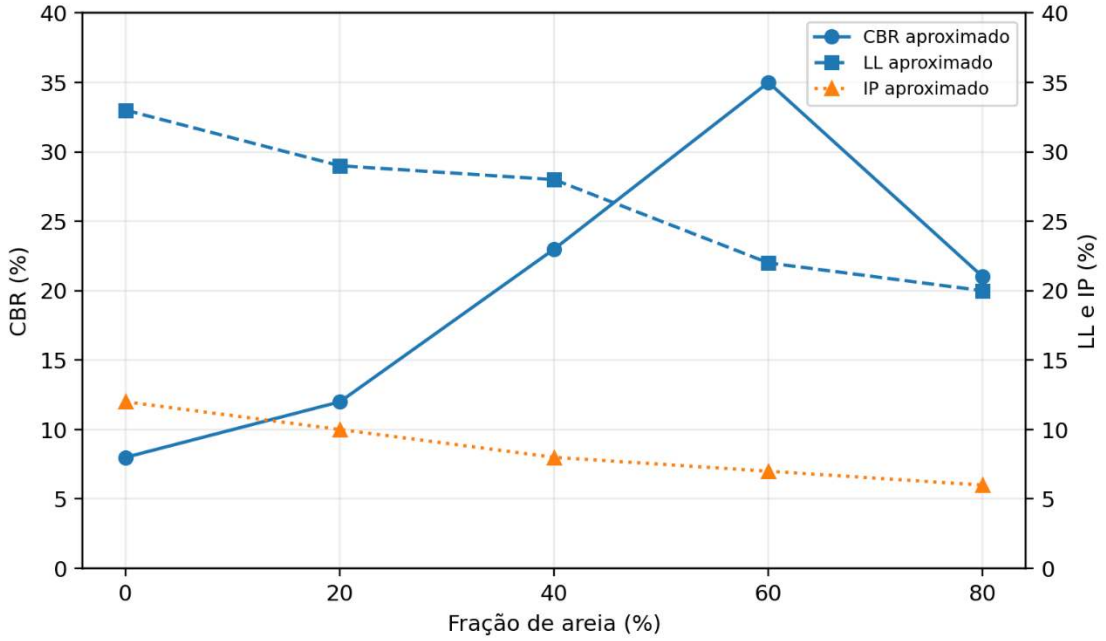
Valoura, Silva e Furlan (2022) também demonstraram, em misturas solo-agregado-cimento, que proporções distintas de agregado e solo modificam o desempenho e exigem dosagem. Tavares, Furlan e Fabbri (2025), ao estudar ciclos de molhagem e secagem em misturas solo-agregado-cimento, destacam que a durabilidade frente à água deve acompanhar a resistência inicial. Apesar de esses trabalhos incluírem cimento e, portanto, não serem diretamente equivalentes a uma estabilização puramente granulométrica, eles reforçam a necessidade de observar simultaneamente resistência, rigidez, umidade, durabilidade e proporção dos constituintes.

2.4 EVIDÊNCIA DE TEOR ÓTIMO: REDUÇÃO DO IP E COMPORTAMENTO NÃO MONOTÔNICO DO CBR

O material técnico recente de Barroso (2024), elaborado no contexto de estudos sobre solos tropicais e pavimentos, apresenta uma lâmina específica intitulada “Estabilização Granulométrica com

Areia de Rio". Nela, a estabilização é descrita como combinação de solos e/ou agregados em proporções adequadas para melhorar o material de origem. A lâmina reproduz uma série histórica de resultados de estabilização granulométrica e traz duas curvas em função da fração de areia: uma para o CBR e outra para limite de liquidez e índice de plasticidade. A origem histórica dos dados deve ser registrada, mas a utilização no presente artigo ocorre por meio do material técnico recente fornecido e é especialmente didática para demonstrar o conceito de teor ótimo.

Figura 1 - Tendência aproximada de CBR, limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) com a elevação da fração de areia.



Fonte: elaboração própria com base na lâmina técnica de Barroso (2024). Valores lidos aproximadamente do gráfico reproduzido no material recente.

A leitura aproximada do gráfico indica que, à medida que a fração de areia passa de 0% para 80%, o IP cai de cerca de 12% para aproximadamente 6% e o limite de liquidez também diminui. O CBR, entretanto, segue outra trajetória: parte de valor baixo, cresce até atingir seu maior nível em torno de 60% de areia e depois recua quando a fração arenosa chega a 80%. A importância do resultado não está em usar 60% como "receita" para Roraima, pois o solo do estudo e o solo da BR-210 não são necessariamente equivalentes. O que a curva demonstra é a existência de uma resposta não monotônica: o teor que mais reduz a plasticidade não é, necessariamente, o teor que maximiza a capacidade de suporte.

Esse comportamento é coerente com a mecânica das misturas solo-agregado. Em uma faixa favorável, a fração granular contribui para contatos entre partículas e os finos participam do preenchimento de vazios, resultando em arranjo mais denso e resistente. Quando a proporção é deslocada excessivamente para a fração granular, a mistura pode alterar sua estrutura, perder coesão e se tornar mais difícil de manter homogênea e estável nas condições reais de umidade. A literatura contemporânea sobre misturas de solos com materiais granulares, embora empregue diferentes agregados, também encontra máximos ou equilíbrios em teores intermediários (Almeida *et al.*, 2021; Fajardo *et al.*, 2026).

Portanto, quando uma mistura com 35% de areia ainda apresenta IP de 12%, há duas perguntas distintas. A primeira é se doses adicionais conseguem reduzir o índice de plasticidade para a faixa desejada. A segunda, mais importante, é se essa dose adicional preserva ou melhora ISC/CBR, expansão, módulo de resiliência, deformação permanente e estabilidade frente à umidade. A engenharia não deve responder à segunda pergunta apenas com a resposta positiva da primeira. Se a curva de suporte do material local atingir um máximo e começar a cair antes de se obter um conjunto satisfatório de requisitos, a continuidade da estabilização com areia deixa de ser a alternativa mais racional.

2.5 REQUISITOS DA DNIT 141/2022-ES E INTERPRETAÇÃO CORRETA DO LIMITE DE PLASTICIDADE

A DNIT 141/2022-ES estabelece a sistemática para execução de base estabilizada granulometricamente. No próprio texto normativo, “a combinação dos solos ou material selecionado na fase de projeto deve proporcionar melhoria substancial nas características do solo puro que justifique seu emprego” (DNIT, 2022a, p. 3). No método empírico, a especificação reúne critérios de suporte e de índices físicos; em análises mecanicistas, também prevê valores de módulo de resiliência e deformação permanente definidos no projeto. O conjunto dos requisitos mais diretamente relacionado ao problema deste estudo está sintetizado no Quadro 1.

Quadro 1 - Critérios relevantes da DNIT 141/2022-ES para base estabilizada granulometricamente.

Parâmetro	**Critério da DNIT 141/2022-ES**	**Interpretação para a dosagem**
Expansão	máxima de 0,5%	A mistura deve controlar variação volumétrica.
ISC/CBR - método empírico	≥ 60% para N ≤ 5 x 10^6; ≥ 80% para N > 5 x 10^6	A redução do IP não pode ocorrer às custas de suporte insuficiente.
Limite de liquidez	≤ 25%	Índice físico usado na seleção empírica.
Índice de plasticidade	≤ 6%	É o limite empírico diretamente relacionado ao caso relatado.
Equivalente de areia	> 30% quando LL ou IP forem ultrapassados	A norma traz alternativa de enquadramento; IP > 6% não deve ser analisado isoladamente.
MR e DP	conforme projeto, quando houver análise mecanicista	Permitem verificar rigidez e suscetibilidade à deformação permanente.

Fonte: elaboração própria com base em DNIT (2022a).

Esse quadro exige uma ressalva importante para a argumentação. O valor de IP igual a 12% relatado para a mistura com 35% de areia está acima do limite usado no enquadramento empírico. Em termos literais, a DNIT 141/2022-ES estabelece "Índice de plasticidade ≤ 6%" e prevê "Equivalente de areia > 30% quando os limites para limite de liquidez e índice de plasticidade forem ultrapassados" (DNIT, 2022a, p. 4). Por essa razão, seria tecnicamente excessivo afirmar que um IP de 12%, sozinho, "proíbe" necessariamente o material. A análise correta é que esse resultado sinaliza o não atendimento do critério usual e exige verificar o conjunto normativo, inclusive equivalente de areia, ISC, expansão e, conforme o projeto, MR e DP.

Essa interpretação torna a justificativa pela BGS mais consistente, e não mais fraca. Em vez de depender de uma única frase normativa, a decisão passa a ser sustentada por uma sequência de evidências: a correção com 35% de areia não reduziu o IP ao valor de referência; doses maiores precisam ser confrontadas com a curva de suporte e demais parâmetros; a literatura mostra que o teor ótimo não coincide obrigatoriamente com o menor IP; e uma base pétrea graduada pode ser selecionada quando oferece comportamento mais previsível e controlável. A própria norma determina que "deverá ser previamente executado um segmento experimental para avaliar a dosagem da mistura, a compactação e o atendimento às definições de projeto" (DNIT, 2022a, p. 3), o que reforça a natureza experimental e verificável da escolha.

A correção da identificação normativa também é relevante. A DNIT 142/2022-ES, mencionada inicialmente como referência ao limite de plasticidade, é uma especificação para base de solo melhorado com cimento. Ela não é a norma principal para uma mistura solo-areia ou para uma base estabilizada apenas granulometricamente. Para o argumento desenvolvido neste TCC, a referência central deve ser a DNIT 141/2022-ES. A DNIT 142/2022-ES só deve aparecer para esclarecer essa

distinção e evitar que uma defesa técnica seja questionada por imprecisão documental (DNIT, 2022a; DNIT, 2022b).

2.6 BRITA GRADUADA SIMPLES COMO ALTERNATIVA À DEPENDÊNCIA DE UMA MATRIZ FINA DE ELEVADA PLASTICIDADE

A brita graduada simples é uma solução granular em que o desempenho decorre predominantemente do esqueleto pétreo, da distribuição granulométrica, da compactação e do confinamento. Ao substituir uma base cuja resposta depende fortemente de solo fino de elevada plasticidade por material pétreo graduado, reduz-se a necessidade de "corrigir" a consistência do solo apenas pela diluição com areia. Isso não dispensa ensaios: a BGS deve ser caracterizada, dosada, executada e controlada conforme o projeto e a especificação aplicável. A vantagem técnica está em mudar a natureza do problema, passando de uma mistura ainda sensível à fração plástica para uma camada cuja estrutura resistente é governada principalmente pelos contatos entre agregados.

Pesquisas recentes sobre materiais granulares mostram a importância do módulo de resiliência e da deformação permanente na previsão do desempenho. Santos *et al.* (2024) verificaram que diferentes composições granulares podem aumentar significativamente o módulo de resiliência, mas também apresentaram respostas distintas quanto à deformação permanente conforme o estado de tensões. Cabral (2021), estudando materiais granulares da região de Mossoró/RN, investigou justamente modelos de deformação permanente e destacou a necessidade de caracterização compatível com o comportamento sob cargas repetidas. Esses resultados apoiam a adoção de critérios de desempenho para escolher entre alternativas de base.

Back *et al.* (2025) analisaram misturas de brita graduada tratada com cimento - BGTC - produzidas com rochas distintas e observaram diferenças no comportamento à fadiga. Embora BGTC não seja BGS, o estudo é útil para mostrar que nem mesmo materiais pétreos podem ser tratados como produtos uniformes: origem mineralógica, graduação e condições de ensaio interferem no desempenho. Por isso, o argumento deste artigo não é que "brita sempre é melhor que solo", mas que, quando a estabilização do solo local exige teores crescentes de areia e passa a comprometer suporte ou confiabilidade, uma base pétrea adequadamente qualificada pode representar solução mais controlável.

Patricio *et al.* (2025), ao estudar solos modificados para pavimentação, mostram que técnicas de estabilização devem ser avaliadas por uma bateria de propriedades e não apenas por mudança de um índice. O mesmo raciocínio aparece em Almeida, Sales e Cavalcante (2024): o material granular

incorporado pode reduzir plasticidade e expansão, mas o enquadramento final depende do conjunto das exigências. Para uma decisão de campo, esse enfoque é essencial porque evita escolher uma dosagem apenas por conveniência executiva e exige demonstrar que a solução adotada atende à função estrutural da base.

No contexto amazônico e de Roraima, fatores logísticos também podem influenciar fortemente o custo e a disponibilidade de agregados. Entretanto, o custo não deve ser analisado isoladamente quando a solução alternativa não consegue apresentar parâmetros seguros. A estabilização com material local pode ser economicamente atraente até o ponto em que a quantidade adicional, a necessidade de homogeneização, a variabilidade do solo e o controle de umidade passem a elevar risco e retrabalho. Nesse limite, a BGS pode se justificar não apenas pela resistência imediata, mas pela previsibilidade de produção, espalhamento, compactação e controle tecnológico.

2.7 INTERPRETAÇÃO TÉCNICA DA SITUAÇÃO RELATADA PARA A BR-210/RR

Para o trecho da BR-210 considerado neste trabalho, a informação disponível é que a mistura de reforço granulométrico com 35% de areia apresentou índice de plasticidade de 12%. Esse dado é suficiente para uma primeira constatação: a mistura permaneceu acima do valor de 6% adotado como referência empírica pela DNIT 141/2022-ES. Não é suficiente, porém, para afirmar sozinho que a mistura estaria integralmente reprovada, porque a norma permite avaliar equivalente de areia quando os limites de LL ou IP são ultrapassados. Também não foram fornecidos, para este artigo, os resultados de equivalente de areia, expansão, ISC da mistura de 35%, MR ou DP. Por responsabilidade técnica, esses valores não são presumidos.

A partir daí, a decisão deve ser organizada como problema de dosagem. Se a alternativa fosse continuar aumentando a areia, cada novo teor deveria ser submetido à caracterização e aos ensaios de suporte correspondentes. O material de Barroso (2024) mostra exatamente por que esse cuidado é necessário: a plasticidade continua diminuindo mesmo após o CBR atingir seu máximo e começar a cair. Assim, perseguir o IP de 6% por simples acréscimo de areia pode levar a uma mistura menos capaz de suportar cargas. O resultado histórico não determina o percentual ótimo da BR-210, mas comprova que existe fundamento técnico para investigar um ponto de inflexão e abandonar a estabilização com areia quando os ganhos de consistência deixam de ser acompanhados por ganhos mecânicos.

Na situação relatada, a opção por brita corrida/BGS pode ser apresentada academicamente como uma mudança de estratégia de estabilização: em vez de continuar elevando a fração arenosa de

um solo ainda muito plástico, adota-se uma base granular predominantemente pétrea, cuja graduação e compactação possam ser controladas diretamente. Para que essa justificativa seja robusta em processo de fiscalização, o registro ideal deve reunir os boletins laboratoriais do solo natural, das misturas testadas, da BGS utilizada, os resultados de compactação e suporte, as aprovações de jazida e/ou pedreira, os registros de segmento experimental e as decisões formais de supervisão. O TCC fornece o fundamento científico e normativo, mas os documentos de obra são os que demonstram que esse fundamento foi efetivamente atendido no trecho executado.

Também é recomendável separar três afirmações. A primeira, que pode ser sustentada pelos dados relatados, é que 35% de areia não foi suficiente para reduzir o IP abaixo de 6%. A segunda, sustentada pela literatura, é que aumentar areia indefinidamente não garante crescimento do CBR e pode haver teor ótimo. A terceira, que depende de ensaios específicos da BR-210, é qual percentual de areia produziria o melhor equilíbrio naquele solo e se a BGS executada apresentou parâmetros superiores. Manter essas três afirmações separadas evita extrapolações e fortalece a credibilidade técnica do trabalho.

Fajardo *et al.* (2026), Almeida *et al.* (2021) e Almeida, Sales e Cavalcante (2024) são particularmente úteis para esse cuidado metodológico porque trabalham com várias proporções e mostram que o desempenho muda com o teor incorporado. Embora utilizem RAP e não areia de rio, seus resultados atuais confirmam uma regra geral da estabilização granulométrica: a dosagem é material-específica. Em outras palavras, não há percentual universal de areia que transforme qualquer solo laterítico plástico em boa base; há uma faixa que precisa ser determinada por ensaios com os materiais realmente disponíveis na obra.

A decisão por BGS também deve ser examinada à luz do método de dimensionamento. Em projeto empírico, os critérios de ISC, expansão e índices físicos indicados na DNIT 141/2022-ES assumem papel direto. Em projeto mecanístico, MR e DP passam a ter importância explícita; para o controle da mistura, a norma determina que os valores obtidos nesses ensaios “não devem variar de forma significativa daqueles definidos na fase de projeto” (DNIT, 2022a, p. 6). Bona e Guimarães (2021) mostram que uma laterita pode revelar resposta melhor em ensaios mecanísticos do que sugeriria o CBR isolado. Cabral, Barroso e Silva (2021) e Araújo (2023) reforçam que a deformação permanente deve ser considerada na seleção de materiais. Assim, a melhor defesa técnica da solução não consiste em substituir um indicador único por outro, mas em mostrar que a alternativa escolhida apresenta um conjunto mais favorável e verificável de propriedades para a estrutura projetada.

2.8 CRITÉRIOS PARA DOCUMENTAR A DECISÃO DE ENGENHARIA E REDUZIR CONTROVÉRSIAS DE FISCALIZAÇÃO

Uma decisão de campo pode ser tecnicamente correta e, ainda assim, tornar-se vulnerável a questionamentos quando a cadeia de evidências não está organizada. Para uma alteração de material de base, a documentação deve permitir reconstruir o motivo da mudança: caracterização do solo originalmente previsto; dosagens de correção avaliadas; resultados de IP, LL, equivalente de areia, expansão e ISC; resultados de MR e DP quando exigidos; comparação com critérios do projeto; caracterização da BGS adotada; definição de umidade e energia de compactação; e comprovação dos resultados obtidos na pista. Quanto ao controle de execução, a DNIT determina que ele "deve ser exercido mediante a coleta de amostras, ensaios e determinações feitas de maneira aleatória" (DNIT, 2022a, p. 6). Esse procedimento, associado ao segmento experimental e aos controles da mistura e da compactação, reforça a importância de registrar a decisão e não apenas o produto final.

O segmento experimental é particularmente importante para materiais sujeitos à variabilidade. Ele permite testar dosagem, sequência de equipamentos, número de passadas, homogeneização e resposta da camada compactada antes da produção em escala. O Guia PRO-MeDiNa para segmentos experimentais também reforça a lógica de validação em campo e monitoramento do comportamento. Em um contexto de fiscalização, a demonstração de que a solução foi precedida por avaliação laboratorial e validada em trecho experimental é mais convincente do que uma justificativa posterior baseada apenas em experiência profissional (DNIT, 2023d).

A literatura mostra ainda que os materiais locais devem ser tratados com atenção à variabilidade. Almeida (2024) discute dimensionamento e comportamento em rodovias de baixo volume de tráfego sob condições reais de materiais e clima, enquanto Araújo e Farias *et al.* (2025) demonstram que a classificação tropical ajuda a prever melhor a aptidão dos solos. Esses trabalhos indicam que uma solução de engenharia em Roraima deve combinar conhecimento regional com critérios objetivos. A experiência de campo orienta a hipótese, mas o laboratório e o controle tecnológico transformam essa hipótese em evidência.

Por fim, o uso acadêmico da situação da BR-210 deve permanecer distinto de uma conclusão jurídica ou administrativa. Este artigo não dispõe do projeto executivo completo, das memórias de cálculo, dos boletins de ensaios originais nem dos autos de fiscalização. Seu papel é demonstrar que existe base técnico-científica para rejeitar a ideia de que a adição crescente de areia seja sempre a solução correta e para reconhecer a BGS como alternativa plausível quando a estabilização solo-areia

não consegue atender simultaneamente aos requisitos de plasticidade e desempenho. A avaliação de conformidade do serviço executado, por sua vez, depende da documentação específica da obra.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa permitiu compreender que a estabilização granulométrica de solos lateríticos de elevada plasticidade não pode ser tratada como um procedimento linear em que a simples elevação do teor de areia conduz, necessariamente, a uma base melhor. A areia pode reduzir o limite de liquidez e o índice de plasticidade, mas essa melhoria física precisa ocorrer sem perda da capacidade de suporte, da estabilidade volumétrica e do comportamento diante das cargas repetidas. A relação entre esses parâmetros depende da natureza do solo, da granulometria do material incorporado, da umidade, da energia de compactação e da proporção final da mistura.

A situação relatada para a BR-210/RR, na qual uma mistura com 35% de areia ainda apresentou índice de plasticidade de 12%, mostra que a correção testada não atingiu o valor de referência de 6% utilizado no enquadramento empírico da base estabilizada granulometricamente. Ao mesmo tempo, a análise normativa demonstrou que esse dado não deve ser usado de forma isolada, pois existe a possibilidade de verificação pelo equivalente de areia quando os limites de liquidez ou plasticidade são ultrapassados. Essa ressalva é importante para que a justificativa técnica seja precisa e não dependa de uma interpretação incompleta da norma.

O estudo também permitiu corrigir a identificação do documento normativo central. A especificação diretamente relacionada à base estabilizada granulometricamente é a DNIT 141/2022-ES. A DNIT 142/2022-ES refere-se à base de solo melhorado com cimento e não constitui a referência principal para uma mistura de solo e areia sem estabilizante químico. A precisão dessa distinção fortalece o trabalho e evita que a argumentação seja fragilizada por erro de enquadramento.

O principal resultado conceitual é a confirmação de que pode existir um teor ótimo de material granular. O exemplo apresentado no material técnico da Universidade Federal do Ceará evidencia uma situação em que a plasticidade continua diminuindo enquanto a curva de CBR, depois de crescer, passa a cair. Isso significa que a decisão de aumentar a areia apenas para alcançar determinado índice de plasticidade pode conduzir a uma mistura mecanicamente menos eficiente. O percentual que produz melhor equilíbrio não pode ser transferido de um solo para outro e precisa ser determinado experimentalmente.

Nesse contexto, a adoção de brita graduada simples pode ser tecnicamente justificável quando a alternativa solo-areia não apresenta, de forma conjunta, parâmetros adequados de plasticidade, suporte, expansão e comportamento mecânico. A BGS não deve ser defendida por uma suposta superioridade automática de qualquer material pétreo, mas pela possibilidade de formar uma camada granular com propriedades mais previsíveis, desde que a brita utilizada seja adequadamente caracterizada, dosada, compactada e controlada. A escolha ganha maior consistência quando resultados de laboratório e de campo demonstram que insistir em maiores teores de areia implicaria perda de suporte, aumento de variabilidade ou dificuldade de atendimento ao projeto.

Conclui-se, portanto, que o raciocínio técnico adequado para o caso analisado é baseado em desempenho global. O fato de a mistura com 35% de areia ter permanecido com IP de 12% constitui um alerta relevante e justifica testar alternativas, mas a comprovação definitiva da melhor solução exige considerar os demais resultados do material específico da BR-210. Para fins de apresentação acadêmica e eventual apoio documental a discussões de fiscalização, recomenda-se que este artigo seja acompanhado, quando disponíveis, pelos boletins de ensaios das dosagens realizadas, resultados da BGS, registros do segmento experimental e documentos de aprovação da solução. Com essa documentação, a decisão deixa de ser apresentada como preferência construtiva e passa a ser demonstrada como escolha de engenharia baseada em critérios, ensaios e desempenho.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Antonia Fabiana Marques. **Análise de rodovias de baixo volume de tráfego quanto ao dimensionamento, ocorrência de defeitos e impactos climáticos nos acostamentos**. 2024. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

ALMEIDA, Guilherme; SALES, Lucila Costa; CAVALCANTE, Erinaldo. Geotechnical properties analysis in soil, reclaimed asphalt pavement (RAP) and Portland cement mixtures for use as pavement layers. **Geociências**, v. 43, n. 2, p. 223-235, 2024. DOI: 10.5016/geociencias.v43i2.18256.

ALMEIDA, Victor Garcia de et al. Diferentes metodologias de dosagem de misturas solo-RAP para uso em pavimentação. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 36210, 2021. DOI: 10.11137/1982-3908_2021_44_36210.

ARAÚJO, Matheus Jesus Ribeiro. **Análise do comportamento plástico de solos para otimização dos ensaios de deformação permanente em pavimentos**. 2023. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

ARAÚJO E FARIAS, Manoel Leandro et al. Análise comparativa de métodos de classificação de solos tropicais para aplicações em pavimentos rodoviários. **Transportes**, v. 33, e3046, 2025. DOI: 10.58922/transportes.v33.e3046.

BACK, Ana Helena; BUENO, Lucas Dotto; PINHEIRO, Rinaldo José Barbosa; CERVO, Tatiana Cureau. Comportamento à fadiga de misturas cimentadas do tipo BGTC com duas rochas representativas do Rio Grande do Sul. **Transportes**, v. 33, e3035, 2025. DOI: 10.58922/transportes.v33.e3035.

BARROSO, Suelly Helena de Araújo. **O uso de solos tropicais no dimensionamento de pavimentos**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2024. Material técnico/didático do Subprojeto 02 - Plataforma Integrada de Estruturação e Análise de Dados de Projeto, Construção e Pós-Construção de Pavimentos Rodoviários Federais (2020-2024).

BONA, Ana Carolina Duarte; GUIMARÃES, Antonio Carlos Rodrigues. Avaliação da deformação permanente e resiliente de uma laterita alternativa utilizada em base de pavimento rodoviário. **Transportes**, v. 29, n. 3, 2021. DOI: 10.14295/transportes.v29i3.2404.

CABRAL, Wendel Silva. **Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da microrregião de Mossoró/RN**. 2021. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CABRAL, Wendel Silva; BARROSO, Suelly Helena de Araújo; SILVA, Samuel de Almeida Torquato e. Consideração da deformação permanente de solos ocorridos na região Nordeste na análise mecanística-empírica de pavimentos. **Matéria**, v. 26, n. 4, 2021. DOI: 10.1590/S1517-707620210004.1396.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT 141/2022-ES: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Brasília: DNIT/IPR, 2022a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT 142/2022-ES: Pavimentação - Base de solo melhorado com cimento - Especificação de serviço**. Brasília: DNIT/IPR, 2022b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT 254/2023-ME: Solos - Compactação em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão - Método de ensaio**. Brasília: DNIT/IPR, 2023a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT 259/2023-CLA: Solos - Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura - Classificação**. Brasília: DNIT/IPR, 2023b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT 444/2023-CLA: Classificação de solos tropicais de granulação grossa - Classificação**. Brasília: DNIT/IPR, 2023c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Guia para execução de segmentos experimentais - PRO-MeDiNa**. 2. ed. Brasília: DNIT/IPR, 2023d. Publicação IPR 749.

FAJARDO, Gustavo Antezana et al. Uso de resíduo fresado de pavimento asfáltico para melhoria de solo laterítico argiloso em base de rodovias. **Transportes**, v. 34, e3174, 2026. DOI: 10.58922/transportes.v34.e3174.

FARIAS, Manoel Leandro Araújo e; ARAÚJO, Henrique Antônio Oliveira; RODRIGUES, John Kennedy Guedes. Análise da aplicabilidade de Sistema de Classificação Universal para solos lateríticos utilizados em camadas de pavimentos. **Transportes**, v. 31, n. 1, 2750, 2023. DOI: 10.58922/transportes.v31i1.2750.

PATRICIO, Jonny Dantas et al. Estudo de solos modificados com adição de polímeros para uso em pavimentos rodoviários. **Transportes**, v. 33, e3025, 2025. DOI: 10.58922/transportes.v33.e3025.

SANTOS, Eduarda Fração et al. Avaliação da adição de materiais fresados em camadas granulares para bases de pavimentos asfálticos. **Transportes**, v. 32, n. 3, e2989, 2024. DOI: 10.58922/transportes.v32i3.2989.

SANTOS, Juliana Tanabe Assad dos; SILVA, Paulo Afonso Lopes da; GUIMARÃES, Antonio Carlos Rodrigues. Determinação da incerteza de medição nos ensaios de deformação permanente de solos lateríticos. **Transportes**, v. 30, n. 2, 2678, 2022. DOI: 10.14295/transportes.v30i2.2678.

SOUSA, Mayssa Alves da Silva. **Contribuição ao estudo de solos tropicais finos para uso na pavimentação rodoviária**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

TAVARES, André Lapa de Moraes; FURLAN, Ana Paula; FABBRI, Glauco Tulio Pessa. Efeito dos ciclos de molhagem e secagem no comportamento físico e mecânico de misturas solo-agregado-cimento. **Transportes**, v. 33, e3034, 2025. DOI: 10.58922/transportes.v33.e3034.

VALOURA, Luíza Rijo; SILVA, Matheus Francisco da; FURLAN, Ana Paula. Investigação laboratorial de mistura solo-agregado-cimento. **Transportes**, v. 30, n. 3, 2646, 2022. DOI: 10.14295/transportes.v30i3.2646.