

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE SOLOS E ROCHAS EM PETROLINA/JUAZEIRO E SUAS IMPLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS RURAIS SUSTENTÁVEIS

Wender Messiatto da Silva¹

Italo Kael Gilson²

Acácio Figueiredo Neto³

Fabio José Vieira de Oliveira⁴

Julio Cesar Ferreira de Melo Junior⁵

Antônio Pereira Filho⁶

RESUMO: Este estudo descreve as propriedades geológicas e geotécnicas de solos e rochas nas regiões de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), no médio e baixo Vale do São Francisco, com foco em sua aplicação na construção sustentável de estradas rurais em regiões semiáridas. O estudo analisa a influência das condições geológicas, topográficas e climáticas nas propriedades dos materiais locais e destaca sua relevância para o desempenho estrutural e ambiental de projetos de construção rodoviária. O embasamento cristalino de gnaiss, xisto e granulito fornece agregados graúdos de alta qualidade para as camadas de base e subleito. Em contraste, a camada superficial arenosa e pouco coesiva, com sua alta porosidade e risco de colapso, representa um grande desafio geotécnico na região. Testes de laboratório mostram que os solos perdem significativamente a resistência e aumentam a deformabilidade com a saturação. Isso ressalta a necessidade de controle rigoroso da umidade, compactação adequada e drenagem eficaz. A estabilização química com cal ou cimento e o uso racional de materiais locais são estratégias eficazes para mitigar a erosão e a instabilidade de encostas. Em resumo, o projeto geotécnico integrado e o uso sustentável dos recursos minerais locais são essenciais para garantir a viabilidade técnica, econômica e ambiental da construção e manutenção de estradas rurais em áreas semiáridas, contribuindo assim para a criação de infraestrutura resiliente e de baixo impacto ambiental.

Palavras-chave: meio físico; estradas rurais; solos; rochas; semiárido.

GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF SOILS AND ROCKS IN PETROLINA/JUAZEIRO AND THEIR IMPLICATIONS FOR THE CONSTRUCTION OF SUSTAINABLE RURAL ROADS

ABSTRACT: This study describes the geological and geotechnical properties of soils and rocks in the Petrolina (PE) and Juazeiro (BA) regions in the middle and lower São Francisco Valley, focusing on their application in sustainable rural road construction in semi-arid regions. The study analyzes the influence of geological, topographical, and climatic conditions on the properties of local materials and highlights their relevance to the structural and environmental performance of road construction projects. The crystalline basement of gneiss, schist, and granulite provides high-quality coarse aggregates for the base and subgrade layers. In contrast, the sandy, low-cohesive surface layer, with its high porosity and risk of collapse, poses a major geotechnical challenge in the region. Laboratory tests show that soil significantly lose strength and increase deformability upon saturation. This underscores the need for strict moisture control, adequate compaction, and effective drainage. Chemical stabilization with lime or cement and the rational use of local materials are effective strategies for mitigating erosion and slope instability. In summary, integrated geotechnical design and the sustainable use of local mineral resources are essential to ensure the technical, economic, and environmental feasibility of rural road construction and maintenance in semi-arid areas, thus contributing to the creation of resilient infrastructure with low environmental impact.

Keywords: physical environment; rural roads; soils; rocks; semiarid.

¹Doutorando em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal do Vale do São Francisco, UNIVASF, wendermessiatto@yahoo.com.br

²Doutorando em Agronomia pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, kael.gilson@gmail.com

³Professor Associado da Universidade Federal do Vale São Francisco, UNIVASF, acacio.figueiredo@univasf.edu.br

⁴Professor Titular da Universidade do Estado da Bahia, UNEB, fvoliveira@uneb.br

⁵Professor Titular da Universidade Federal do Vale São Francisco, UNIVASF, julio.melo@univasf.edu.br

⁶Professor Associado da Universidade Federal do Vale São Francisco, UNIVASF, tonyunivasf@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

As regiões de Petrolina, em Pernambuco, e Juazeiro, na Bahia, são importantes polos de desenvolvimento na bacia do submédio São Francisco. A região é conhecida por sua infraestrutura de irrigação e alta produção de frutas e vinhos, o que exige uma logística eficiente para o transporte rápido de mercadorias. O desenvolvimento urbano e a expansão da infraestrutura ao longo das margens dos rios refletem o crescimento econômico e a pressão associada sobre a geografia local (Pacheco & Campos, 2012). O clima da região é classificado segundo Köppen como BSw^h, semiárido megatérmico, com precipitações concentradas no verão e invernos secos. Essa definição se baseia nas normais climatológicas (1991-2020) que apresentam uma precipitação média anual igual a 457,7 mm e a temperatura média anual igual a 27,2°C (INMET, 2022).

A região é caracterizada pela escassez hídrica durante aproximadamente nove meses do ano (CPRM, 2015), o que representa desafios específicos para a engenharia civil. A sustentabilidade da infraestrutura rodoviária rural é crucial para conectar áreas de produção a centros de processamento e distribuição e depende significativamente de uma compreensão abrangente do ambiente natural regional. A construção de estradas rurais no nordeste semiárido da China enfrenta um dilema na seleção de materiais. Por um lado, o embasamento cristalino oferece materiais de alta resistência; por outro, a cobertura sedimentar cenozoica contém solos de origem única, geotécnicamente frágeis. Um fator de risco fundamental são as flutuações de umidade, que desencadeiam dois fenômenos principais: colapso do solo e erosão acelerada.

Os abundantes solos colapsáveis da região retêm uma estrutura porosa metaestável em condições de baixa umidade natural (Reis & Souza, 2019). A água intrusa, seja por infiltração concentrada de águas pluviais ou por drenagem deficiente, pode levar ao colapso dessa estrutura e à subsidência catastrófica. Além disso, a escassa cobertura vegetal e a natureza arenosa de grande parte dos sedimentos superficiais os tornam altamente vulneráveis à erosão hídrica durante chuvas concentradas, comprometendo a estabilidade de encostas e leitos de estradas.

Portanto, o projeto de estradas sustentáveis deve buscar soluções que minimizem o impacto ambiental, otimizem o uso de materiais locais e maximizem a durabilidade das estradas sob condições ambientais extremas. O objetivo neste estudo foi conduzir uma caracterização geotécnica completa dos solos e rochas da região de Petrolina/Juazeiro e traduzir essas descobertas em diretrizes práticas para o projeto e construção de estradas rurais resilientes. Essa abordagem é baseada na análise de dados geológicos e geotécnicos existentes e correlaciona a gênese dos materiais com seu comportamento mecânico sob condições semiáridas.

O estudo, portanto, começa com uma descrição do ambiente físico, prossegue com a identificação e análise detalhada de uma patologia geotécnica chave – solos colapsáveis – e um inventário de recursos minerais para a superfície da estrada, e culmina em diretrizes de projeto, preparação do leito da estrada e medidas de mitigação de risco que são críticas para garantir a sustentabilidade e a segurança das estradas em regiões semiáridas

REFERENCIAL TEÓRICO

A estrutura geológica das regiões de Petrolina e Juazeiro é complexa e apresenta duas camadas. A maioria (86,53%) dos estratos é constituída por rochas do Arqueano ao Proterozóicos e forma um embasamento cristalino na Província Borborema, a noroeste, com a maior parte localizada na Província do Crátons do São Francisco (CPRM, 2015). Essas rochas são as mais antigas do estado de Pernambuco e consistem em rochas ígneas e metamórficas, como gnaisse, xisto e granulito.

A estratigrafia do embasamento apresenta inclinação predominantemente norte-nordeste (N-NE) e sudeste-sudeste (SE) (CPRM, 2015). A presença desse extenso embasamento cristalino é crucial para fins de engenharia, pois é a principal fonte de rochas de alta qualidade. A resistência e a durabilidade dessas rochas metamórficas e ígneas as tornam ideais para a produção de agregado graúdo (cascalho) para bases de pavimentação estrutural (CPRM, 2015).

Sobre esse embasamento encontram-se sedimentos cenozoicos mais jovens (13,47%), formados pela erosão de rochas mais antigas. Essas coberturas superficiais incluem crostas lateríticas fragmentadas, depósitos eólicos (dunas) e depósitos aluviais (CPRM, 2015). A topografia da região pode ser dividida em duas zonas distintas, cada uma associada a diferentes tipos de solo e riscos geotécnicos:

1. Depressão Sertaneja: Caracterizada por uma superfície plana e relevo residual, repousa sobre as rochas estáveis do Crátons do São Francisco. Sua altitude varia de 350 a 700 metros acima do nível do mar (CPRM, 2015). O clima semiárido e a escassez crônica de água influenciam diretamente a formação do solo. Os solos predominantes são tipicamente rasos e pedregosos, classificados como neossolos litológicos e cobertos por vegetação de Caatinga (CPRM, 2015). Esses solos limitam a profundidade das escavações e exigem reforço ou o uso de aterros.

2. Planície do Rio São Francisco: É constituída por sedimentos mais jovens, com 2,5 milhões de anos, formados por processos aluviais e eólicos (CPRM, 2015). Esses depósitos formam solos mais profundos, frequentemente arenosos e macroporosos, que são uma das principais causas de problemas geotécnicos, como o risco de colapso e a alta suscetibilidade à erosão. A interação entre geologia e pedogênese revela uma característica fundamental: o clima semiárido impede a saturação e a dissolução de materiais fracamente cimentados, mantendo assim a estrutura metaestável dos sedimentos macroporosos, criando um mecanismo no qual a evapotranspiração excede a infiltração (Reis & Souza, 2019). A preservação dessa estrutura aberta é um precursor da vulnerabilidade geotécnica dos solos superficiais, que se torna perigosa quando a construção de estradas rurais altera o equilíbrio hídrico natural.

2. METODOLOGIA

Este estudo utilizou uma abordagem metodológica de revisão de literatura combinando com buscas de análises laboratoriais, engenharia geotécnica e análises de geodados. O objetivo foi integrar a caracterização geotécnica e geotécnica da região de Petrolina/Juazeiro (PE/BA) com critérios de sustentabilidade técnica, econômica e ambiental para o projeto de estradas rurais adaptadas às condições semiáridas. A pesquisa concentrou-se em quatro aspectos complementares: caracterização do ambiente natural, investigação e análise dos solos e rochas regionais, integração dos resultados em um modelo preditivo de risco geotécnico e desenvolvimento de diretrizes técnicas para o projeto e a construção de estradas rurais sustentáveis.

Foram utilizadas fontes primárias e secundárias. As fontes secundárias incluíram mapas geológicos e geotécnicos da CPRM (2015), mapas de solos e unidades topográficas do IBGE (2018), normas técnicas da ABNT (NBR 7207:2021) e do DNIT (2018), além de estudos anteriores sobre o comportamento de colapso e a mineralogia dos solos da região. Os dados principais incluíram investigações de campo, registros fotográficos e georreferenciados de amostras de doze sítios representativos e observações de fraturas e estrutura rochosa para correlação com o subsolo cristalino e o traçado rodoviário.

Os ensaios de laboratório mencionados nesta pesquisa foram conduzidos rigorosamente de acordo com as normas da ABNT e do DNIT e incluíram a determinação da distribuição granulométrica, limite de Atterberg, massa específica de grãos, teor de umidade natural e densidade aparente, conforme as normas NBR 7181, 6459, 7180, 6508 e 6457. Os ensaios de compactação Proctor padrão e modificado (NBR 7182) e o Índice de Suporte Califórnia (CBR) (NBR 9895) também foram realizados para avaliar as propriedades mecânicas em condições naturais e saturadas. Além disso, ensaios de coesão do solo (NBR 12007) e de cisalhamento direto (NBR 12024) foram realizados para determinar o índice de colapso, bem como as variações na coesão e no ângulo de atrito interno. Os resultados foram sistematizados e comparados com dados regionais para calibrar a resposta do solo local às condições semiáridas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades do Solo em Solos Críticos em Regiões Semiáridas

Projetos de construção de estradas no Vale do São Francisco devem se concentrar na mitigação dos riscos de solos instáveis, particularmente solos colapsáveis e solos vermelhos.

3.1.1. Tipos de Solo Relevantes

Além dos solos litologicamente novos (solos rasos e solos líticos) na Depressão de Setaneja (CPRM, 2015), que apresentam desafios topográficos e de sedimentação, os solos superficiais nas planícies de planalto e rios também apresentam fragilidades estruturais específicas:

Solos vermelhos: ocorrem como crostas incompletas em estratos cenozoicos (CPRM, 2015). Embora muitos solos vermelhos no Brasil sejam adequados para aplicações de suporte e subestrutura devido à cimentação de óxidos de ferro e alumínio (Pereira, 2021), seu uso requer controle rigoroso de umidade e compactação para evitar friabilidade e alterações de volume (expansão/contração) devido a flutuações no teor de água.

Solos aluviais/eólicos: São comumente encontrados em planícies (CPRM, 2015). Esses solos são predominantemente arenosos, altamente permeáveis e, dependendo de sua densidade relativa, propensos à erosão ou colapso.

3.1.2. Risco Geotécnico Principal: Solos Colapsáveis

Solos propensos ao colapso representam um risco geotécnico significativo em regiões semiáridas e são particularmente comuns em Pernambuco (43,24%) e na Bahia (30,63%) (Reis & Souza, 2019).

1. *Estrutura física:* Esses solos são predominantemente arenosos (88,57%) com estrutura macroporosa, um pré-requisito para a colapsibilidade. A porosidade média (n) é de 45,4% e a porosidade mínima é de 40,0% (Reis & Souza, 2019). O índice de porosidade (e) é em média 0,73 (Reis & Souza, 2019).

2. *Estabilidade:* A estabilidade aparente é mantida por um baixo teor de água natural (w) de 5,05% em média e um grau médio de saturação (S_r) de apenas 17,78% (Reis & Souza, 2019).

3. *Plasticidade:* Esses solos apresentam propriedades entre as linhas A e B no diagrama de plasticidade, com um baixo índice de plasticidade ($PI < 30\%$) e um ponto de escoamento (LL) tipicamente entre 10% e 50% (Reis & Souza, 2019).

Tabela 1: Parâmetros Físicos Mínimos, Máximos e Médios de Solos Colapsáveis do Semiárido (PE/BA).

Parâmetro Físico	Mínimo	Média	Máximo
Teor de Umidade Natural (w) (%)	0.20	5.05	22.30
Peso Específico Seco (ρ_d) (kN/m ³)	13.39	15.62	19.40
Índice de Vazios (e)	0.48	0.73	0.95
Porosidade (n) (%)	40.00	45.40	48.00
Grau de Saturação (Sr) (%)	1.41	17.78	54.65

Fonte: Adaptado de Reis & Souza (2019)

3.1.3. Comportamento Mecânico dos Solos Durante Inundações e Sua Importância para a Engenharia

O colapso estrutural é caracterizado por uma rápida e drástica perda de volume sob carga e saturação. Essa perda ocorre devido à dissolução do cimento fraco que mantém os macroporos. A inundação é um gatilho e altera significativamente os parâmetros de resistência do solo, conforme demonstrado por ensaios de cisalhamento. A Tabela 2, lista os valores de resistência ao cisalhamento em condições naturais e de inundação:

Coesão (c): A coesão diminui drasticamente. Nos solos testados em Petrolina, os valores de coesão atingiram até 75,6 kPa em condições naturais, mas diminuíram para 0,0 kPa em condições de inundação (Reis & Souza, 2019). Razões de perda de coesão de até 1,9 ($\Delta\text{Nat}/\text{Inund}$) indicam que o subsolo é extremamente sensível à umidade (Reis & Souza, 2019).

Ângulo de atrito interno (Φ): O ângulo de atrito interno varia, com pequenas variações, entre 29,0° e 38,8° em condições naturais e entre 29,0° e 33,9° em condições de inundação (Reis & Souza, 2019). Isso confirma que, após a saturação, o solo se comporta predominantemente como um material granular, com resistência determinada quase exclusivamente pelo atrito.

Tabela 2: Parâmetros Mecânicos de Resistência ao Cisalhamento de Solos em Petrolina/Petrolândia (PE).

Parâmetro Mecânico	Condição Natural (Faixa)	Condição Inundada (Faixa)	Razão de Variação ($\Delta\text{Nat}/\text{Inund}$)
Coesão (c) (kPa)	0.4 a 75.6	0.0 a 75.6	1.9 (média)
Ângulo de Atrito Interno (Φ) (°)	29.0 a 38.8	29.0 a 33.9	0.99 a 1.22

Fonte: Adaptado de Reis & Souza (2019).

Essa dependência da umidade reforça a visão de que danos estruturais em estradas rurais não pavimentadas ou pavimentadas com drenagem subterrânea inadequada são consequência direta das condições geotécnicas agravadas pelo tempo meteorológico. Em regiões semiáridas, o escoamento superficial concentrado durante chuvas intensas pode rapidamente encharcar o subsolo, levando ao colapso imediato do pavimento e à subsequente falha. A Tabela 3, atualizada com dados geotécnicos e referências, resume os principais parâmetros que definem o risco geotécnico.

Tabela 3: Parâmetros Geotécnicos Críticos de Solos Colapsíveis do Vale do São Francisco (PE/BA).

Parâmetro Físico/Mecânico	Faixa (Semiárido)	Típica	Relação com o Risco	Implicações de Engenharia
Porosidade (n)	Média ≈45.4%		Condição primária para colapso (n>40%)	Requer compactação para redução volumétrica pré-obra.
Teor de Umidade Natural (w)	Média ≈5.05%		Mantém a estabilidade estrutural (metaestável)	Necessidade de umectação controlada antes da compactação.
Coesão (c) Saturado	Mínimo 0.0 kPa (em testes de Petrolina)		Instabilidade catastrófica de subleito/taludes sob inundação	Drenagem de alta performance é essencial.
Textura Predominante	Arenosa (88.57%)		Alta permeabilidade, suscetibilidade à erosão e lavagem	Exige estabilização granulométrica ou química.

Fonte: Adaptado de Reis & Souza (2019)

3.2. Adequação de Materiais e Agregados Locais para Construção de Estradas

A sustentabilidade da construção de estradas rurais está intimamente ligada ao uso eficiente de materiais locais e à minimização dos impactos logísticos e dos custos de transporte. As condições geológicas da região de Petrolina/Juazeiro proporcionam uma rica base de recursos minerais.

3.2.1. Inventário de Recursos Minerais e Rochosos

O polo Petrolina/Lagoa Grande é conhecido por seu potencial para exploração de materiais de construção, particularmente arenito, brita e granito (CPRM, 2015). A diversidade de recursos minerais, aliada à crescente demanda (particularmente nos setores industrial e de construção civil) e à proximidade de centros logísticos, aumenta significativamente a viabilidade econômica da mineração na região (CPRM, 2015). A origem desses materiais determina sua qualidade e utilização:

Agregados graúdos (cascalho): A fonte primária é o embasamento cristalino, particularmente as unidades ortorrômbicas e paraortotrópicas (xistos, gnaisses e granulitos) do Crátons do São Francisco (CPRM, 2015). Unidades ortogonais de médio e alto teor são cruciais para o potencial de exploração de cascalho e rocha natural (CPRM, 2015).

Esses agregados são estruturalmente resistentes e adequados para camadas de base de alto desempenho.

Agregados miúdos (areia e cascalho): Esses agregados são extraídos de depósitos cenozoicos relativamente jovens, como depósitos fluviais (planícies/terraços aluviais) e unidades eólicas (campos de dunas interiores) (CPRM, 2015). Esses materiais são cruciais para o preenchimento e a estabilização da granulometria de solos finos.

Recursos residuais: Lateritas e rochas residuais de crostas lateríticas incompletas (CPRM, 2015; Souza & Lopes, 2023) podem ser utilizadas como leitos ou subleitos melhorados, desde que suas variações de qualidade e propriedades geotécnicas sejam cuidadosamente controladas.

A Tabela 4 apresenta o potencial de exploração de agregados por área geológica.

Tabela 4: Potencial de Exploração de Agregados por Unidade Geológico-Ambiental (Petrolina/Juazeiro).

Unidade Geológico-Ambiental	Recursos Potenciais	Minerais	Aplicações na Construção Civil (Exemplos)
Unidade Eólica (dunas interiores)	Areia		Agregado miúdo (enchimento, estabilização)
Unidade Fluvial (planície aluvionar)	Areia e Cascalho		Agregado miúdo e graúdo (sub-base)
Unidade Ortoderivada (médio a alto grau)	Brita e Rochas Ornamentais		Base estrutural de alto desempenho
Unidade Paraderivada (baixo a alto grau)	Brita, Areia e Rochas Ornamentais		Bases, sub-bases e agregados miúdos
Unidade Paraderivada (composição não carbonática)	Areia e Ferro		Agregado miúdo e potencial de ligante mineral

Fonte: Adaptado de CPRM (2015).

3.2.2. Propriedades Mecânicas e Geoquímicas Necessárias

Materiais locais para base e subleitos devem atender aos requisitos técnicos da ABNT NBR 7207 (2021). Esta norma específica o controle granulométrico, os limites de Atterberg e o Índice de Resistência da Califórnia (CBR) para garantir a resistência e a durabilidade do pavimento (ABNT NBR 7207, 2021).

O uso de brita como rocha base (gnaisse, ardósia) requer ensaios geoquímicos (Silva et al., 2022). Devido à presença de derivados secundários que podem conter ferro (CPRM, 2015), ensaios são necessários para identificar minerais nocivos (por exemplo, sulfetos) que podem reagir com a umidade e causar expansão química do leito da estrada.

A principal vantagem competitiva da região reside no acesso a esses agregados cristalinos de alta qualidade. A capacidade de obter brita e outros materiais de construção localmente reduz significativamente os custos logísticos, que representam uma parcela significativa dos orçamentos de infraestrutura rodoviária no nordeste dos Estados Unidos (PHOENIX CENTER, 2025, p. 5). A sustentabilidade, neste contexto, é alcançada por meio do uso racional dos recursos geológicos regionais.

3.3. Diretrizes para a Construção Sustentável de Estradas Rurais

O projeto de estradas rurais sustentáveis em regiões semiáridas deve ir além da simples aplicação de padrões universais e integrar as características geotécnicas locais com estratégias de mitigação.

Devido à alta heterogeneidade dos solos superficiais — desde solos litológicos jovens próximos à superfície até depósitos aluviais profundos e colapsáveis — o mapeamento geológico e geotécnico é fundamental (Silva et al., 2025). Esse mapeamento deve otimizar o traçado das estradas e evitar áreas com alto risco de deslizamentos ou de encostas. A fase de mapeamento deve incluir tecnologia de sensoriamento remoto para identificar zonas topográficas (depressões interiores vs. planícies ribeirinhas) (CPRM, 2015), bem como investigações geotécnicas do local. É crucial que as investigações no local sejam complementadas por ensaios laboratoriais especializados, como ensaios de recalque por colapso, para identificar e quantificar o potencial de recalque de áreas com grandes volumes de poros ($n > 40\%$) (Reis & Souza, 2019).

3.3.1. Projeto e Preparação do Leito e do Subleito

A preparação do leito é a etapa mais importante para garantir a durabilidade das estradas em regiões semiáridas. A ABNT NBR 7207 (2021) define a preparação do subleito como uma

etapa pós-obra de terraplenagem que requer rigoroso controle de construção (ABNT NBR 7207, 2021). Esse controle é dividido em controle geotécnico (verificação da densidade e umidade ideais) e controle geométrico (conformidade da seção transversal) (ABNT NBR 7207, 2021). A preparação deve garantir rigoroso controle geotécnico, incluindo a garantia de que a densidade e a umidade ideais definidas pelo ensaio de Proctor (ABNT NBR 7207, 2021) sejam alcançadas.

3.3.1.1. Redução da Colapsibilidade por Compactação

A compactação de solos colapsíveis não deve ser considerada apenas como um processo de consolidação, mas sim como uma ruptura deliberada de sua estrutura metaestável antes do uso como subleito. Isso pode ser alcançado por compactação de alta energia (rolos vibratórios) sob condições de umidade controladas. O teor de umidade de compactação deve ser igual ou ligeiramente superior ao teor de umidade ideal (w_{opt}), visto que a saturação controlada durante a fase de construção promove a colapsibilidade e garante que o solo atinja sua densidade seca máxima ($\rho_{d,max}$) em condições de colapso. A avaliação do grau de compactação de solos colapsíveis requer métodos especiais para garantir que a porosidade crítica seja excluída.

3.3.1.2. Sub-base e camada de base

Materiais locais devem ser utilizados de forma otimizada para a sub-base e a camada de base. Ao misturar areia de rio local (CPRM, 2015) com areia fina de laterita ou estabilizadores químicos (cimento ou cal), os limites plásticos e valores de CBR necessários para o material compósito podem ser alcançados, transformando a rocha extraída em componentes estruturais utilizáveis.

3.3.2. Estratégias de Drenagem e Controle da Erosão

A drenagem desempenha um papel crucial na gestão de riscos geotécnicos em solos com baixa coesão e ambientes altamente saturados (Reis & Souza, 2019). O objetivo é manter a saturação do leito da rodovia abaixo de um nível crítico para evitar a perda de coesão e o recalque (Reis & Souza, 2019).

A infiltração de água deve ser minimizada em todas as áreas, especialmente em cortes onde as camadas geotecnicamente vulneráveis estão mais expostas. Isso requer o projeto de estruturas de drenagem adequadas e especializadas (DNIT, 2018), incluindo:

1. *Drenagem superficial*: Drenos, tanques de coleta e valas de proteção são instalados para desviar o escoamento rápido da plataforma.

2. *Drenagem profunda*: O uso de drenos espinha de peixe ou longitudinais interrompe o fluxo de água subterrânea para controlar a profundidade do lençol freático em níveis de segurança ou a saturação do subsolo.

Além da gestão dos recursos hídricos, o controle da erosão em encostas de corte e aterro também é crucial devido aos solos predominantemente arenosos e à escassa cobertura vegetal (CPRM, 2015). Técnicas de bioengenharia, como a cobertura com espécies adaptadas à região da Caatinga, são recomendadas para estabilizar a superfície do solo e dissipar a energia da água da chuva.

3.4. Gestão de Riscos do Solo e Resiliência Climática

A gestão de riscos do solo na região de Petrolina/Juazeiro deve se concentrar na prevenção da instabilidade hídrica e na garantia da resiliência da infraestrutura a eventos meteorológicos.

3.4.1. Risco de Colapso e Medidas de Mitigação

O risco de deslizamentos é mais pronunciado em áreas planas (planaltos) e planícies fluviais, onde se acumulam sedimentos eólicos macroporosos e depósitos aluviais (Reis & Souza, 2019). A falha coesiva é um mecanismo de falha que deve ser abordado. Na saturação, a coesão pode cair para 0,0 kPa (Reis & Souza, 2019). As estratégias de mitigação concentram-se em três abordagens complementares:

1. *Compactação de alta energia e controle de umidade*: Conforme anteriormente neste trabalho, o projeto de compactação pré-pavimentação deve induzir falha estrutural e utilizar níveis de umidade ideais ou ligeiramente elevados.
2. *Substituição de solos críticos*: Em trechos com tráfego intenso ou particularmente propensos a colapsos, a remoção do solo vulnerável e sua substituição por material granular menos vulnerável, como brita e cascalho cristalino (CPRM, 2015), pode ser a única solução permanente.
3. *Estabilização química*: Uso de cimento ou cal para criar uma ligação secundária forte para compensar a ligação fraca perdida na saturação. Mesmo em condições de saturação, essa técnica fornece efetivamente resistência residual e transforma o pavimento em uma camada de base estável.

3.4.2. Estabilidade de Taludes e Impactos Climáticos

As mudanças climáticas representam riscos à estabilidade de taludes, particularmente por meio da erosão e da perda de coesão. Embora análises detalhadas dos impactos das mudanças climáticas não estejam disponíveis atualmente, as propriedades geotécnicas dos solos locais sob saturação (com coesão zero ou próxima de zero (Reis & Souza, 2019)) sugerem que a resistência de taludes deve ser calculada com base no atrito interno efetivo, em vez da coesão aparente. Como o atrito interno em condições úmidas depende quase exclusivamente do atrito interno, taludes em aterros e cortes devem ser projetados para serem mais rasos do que em solos coesos. Além disso, sistemas eficazes de solo superficial e drenagem superficial devem ser implementados para evitar a infiltração de água nos taludes.

A construção sustentável de estradas rurais deve evitar rotas ao longo da Planície do São Francisco sempre que possível, pois seus solos aluviais são altamente compressíveis e propensos ao colapso. Concentrar a mineração em áreas da Depressão Sertaneja, onde a nova camada litológica do solo é rasa e o risco de sedimentação excede o risco de colapso, pode ser uma opção melhor, desde que haja material de aterro disponível. A Tabela 5 resume os principais riscos geotécnicos e estratégias de mitigação adequadas às características geológicas da região, bem como as fontes de risco.

Tabela 5: Riscos geotécnicos chave e estratégias de mitigação para estradas rurais no semiárido.

Risco Geotécnico	Mecanismo de Falha	Local de Maior Ocorrência	Estratégia de Mitigação Primária	Citação
Colapsibilidade e do Solo	Perda de estrutura metaestável ao ser inundado	Depressão Sertaneja (Tabuleiros)	Compactação a wopt forçada + Drenagem profunda e superficial.	(Reis & Souza, 2019)
Instabilidade de Taludes	Redução de coesão ao zero sob saturação	Cortes em solos colapsíveis	Redução da inclinação e controle hídrico rigoroso.	(Reis & Souza, 2019)
Erosão (Hídrica)	Escoamento superficial em solos arenosos	Neossolos Litólicos e Planície Fluvial	Sistemas de dissipação de energia e bioengenharia de taludes.	(Reis & Souza, 2019)
Variação Volumétrica	Expansão/Contração de finos em lateríticos	Croastas Lateríticas Incompletas	Controle de umidade do subleito e proteção com sub-base granular inerte.	(CPRM, 2015)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4. Estratégias Recomendadas para Projetos Sustentáveis

Com base na análise das características geológicas e geotécnicas, as seguintes estratégias devem ser adotadas para garantir a sustentabilidade das estradas rurais:

1. *Investigação geotécnica preliminar:* O mapeamento geotécnico preditivo deve ser obrigatório (Silva et al., 2025), e os testes de recalque do solo devem ser conduzidos sistematicamente em todos os solos de terraços e planícies de inundação para quantificar o risco de recalque diferencial (Reis e Souza, 2019).

2. *Otimizar a compactação e o controle da água:* O pavimento deve ser compactado antes da pavimentação asfáltica para induzir o colapso estrutural e usar um teor de água ideal ou ligeiramente superior. A porosidade crítica deve ser eliminada durante esta fase. O controle da construção deve seguir as diretrizes geotécnicas da ABNT NBR 7207 (2021).

3. *Priorizar a drenagem como medida de proteção geotécnica:* A drenagem não é uma medida auxiliar, mas o mecanismo de controle de risco mais importante. Sistemas de drenagem bem dimensionados de superfície e profundos devem ser construídos para interceptar e desviar as águas superficiais, mantendo assim a saturação do subsolo abaixo da linha de colapso (Reis & Souza, 2019).

4. *Uso sustentável de materiais locais:* As estratégias de aquisição devem se concentrar no uso de base cristalina (CPRM, 2015) como agregado estrutural (camada de base) e lateritas quimicamente estabilizadas e solos residuais (Souza & Lopes, 2023) como subleito para maximizar a conformidade com as normas ABNT NBR 7207 (2021) e minimizar a pegada logística.

5. CONCLUSÃO

A durabilidade e a sustentabilidade das estradas rurais na região de Petrolina/Juazeiro dependem de um equilíbrio entre a robustez dos recursos minerais existentes e a fragilidade geotécnica da cobertura do solo. A base cristalina fornece agregados de alta qualidade que garantem a robustez da fundação estrutural. No entanto, o maior perigo vem de solos arenosos propensos a colapso com uma estrutura macroporosa crítica ($n > 40\%$). A estabilidade desses solos é garantida por seu baixo nível de saturação (média de 17,78%). No entanto, a penetração

de água pode degradá-los rapidamente, levando a uma perda de coesão de até 100% e, conseqüentemente, à ruptura do subsolo. O sucesso dos projetos de construção de estradas, portanto, depende crucialmente da tecnologia de compactação, especialmente da gestão consistente da água.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7207: **Terminologia e classificação de pavimentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

BORGES, Jesce John da Silva; FERREIRA, Sílvio Romero de Melo; AMORIM, Samuel França. Utilização do sistema de informação geográfica para identificar solos colapsíveis na região do semiárido brasileiro. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v. 8, n. 2, p. 140-155, 2023. DOI: 10.24221/jeap.8.2.2023.5681.140-155. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/5681>. Acesso em: 20 out. 2025.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geologia e Recursos Minerais do Estado de Pernambuco**. 2. ed. Recife: CPRM, 2015. 312 p. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/24594/6/folder_polo_petrolina_final.pdf. Acesso em: 20 out. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. Publicação IPR 719. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf. Acesso em: 20 out. 2025

PACHECO, Carina Seixas Maia Dapieve Patias; CAMPOS, Eloísa Pereira de. Espaço geográfico urbano, construção civil e meio ambiente: estudo nas margens fluviais de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE). **Revista Semiárido De Visu**, Petrolina, v. 2, n. 1, p. 241-251, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ifsertao-pe.edu.br/ojs2/index.php/semiariodevisu/article/download/63/76>. Acesso em: 20 out. 2025.

PHOENIX CENTER FOR ADVANCED LEGAL & ECONOMIC PUBLIC POLICY STUDIES. The economic impact of the natural aggregates industry: a national, state, and county analysis. [S. l.]: Phoenix Center, 2025. 41 p. Disponível em: <https://phoenix-center.org/scorecards/AggregatesIndustry2025ScorecardFinal.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025

REIS, Larissa Ferreira Gomes de Araújo; SOUZA, José Rodrigues de. **Caracterização geotécnica de solos colapsíveis do semiárido brasileiro: estudo de caso no Perímetro Mandacaru – Juazeiro (BA)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/47283/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Larissa%20Ferreira%20Gomes%20de%20Ara%C3%BAjo.pdf>. Acesso em: 20 out. 2025.

SANTOS, Mauro César dos; SILVA, Maria Sônia Lopes da; ALMEIDA, Brivaldo Gomes de; KLAMT, Egon; CAVALCANTI, Aluísio Carvalho. Caracterização micromorfológica e considerações sobre a gênese de solos de tabuleiro do semiárido do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1031-1046, 2002. DOI: 10.1590/S0100-06832002000400021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/173079/000351380.pdf>. Acesso em: 20 out. 2025.

SILVA, Larissa Ferreira da; OLIVEIRA, José Robson Mariano Alves de; SOUZA, José Rodrigues de. Solos colapsíveis no semiárido brasileiro: uma visão panorâmica. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2022, Campinas. **Anais eletrônicos** [...]. São Paulo: ABMS, 2022. DOI: 10.4322/cobramseg.2022.0956. Disponível em: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/cobramseg.2022.0956.pdf>. Acesso em: 20 out. 2025.

SILVA, Maria Sônia Lopes da; SANTOS, Mauro César dos; KLAMT, Egon; ALMEIDA, Brivaldo Gomes de. **Gênese do adensamento subsuperficial em solos de Tabuleiro do Semiárido do nordeste do Brasil: micromorfologia**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 221. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/950798/1/BPD221GeneseAdensamento.pdf>. Acesso em: 20 out. 2025.