

Análise da aplicabilidade de Sistema de Classificação Universal para solos lateríticos utilizados em camadas de pavimentos

Analysis of the applicability of a Universal Classification System for lateritic soils used in pavement layers

Manoel Leandro Araújo e Farias¹, Henrique Antônio Oliveira Araújo²,
John Kennedy Guedes Rodrigues³

¹Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba – Brasil, mlaf.engcivil@gmail.com

²Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba – Brasil, henrique.zamoura@gmail.com

³Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba – Brasil, profkennedy@hotmail.com

Recebido:

26 de fevereiro de 2022

Aceito para publicação:

3 de dezembro de 2022

Publicado:

27 de fevereiro de 2023

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chave:

Solos tropicais.
Classificação.
Rodovias.
Comportamento resiliente.

Keywords:

Tropical soils.
Classification.
Highways.
Resilient behavior.

DOI: 10.58922/transportes.v31i1.2750



RESUMO

O desenvolvimento de um novo procedimento de classificação para solos lateríticos, que leve suas propriedades mineralógicas e físicas em consideração e, ademais, as concepções apropriadas do meio ambiente tropical úmido, permitirá prever suas utilizações em camadas de rodovias com uma porcentagem mais elevada. A pesquisa em questão avalia o potencial uso da Metodologia de Classificação Universal de Solos Lateríticos para fins de construção de estruturas de rodovias. O procedimento metodológico compreendeu um programa de ensaios para a classificação e avaliação do comportamento resiliente dos solos. Com base no comportamento resiliente e nas ponderações sobre as propriedades de deformação permanente adotadas, a análise mecanística-empírica indicou bom comportamento dos solos analisados quando empregados em camadas de base em tráfegos menores. Entretanto, mesmo apresentando boas condições, os solos poderiam necessitar de estabilização, seja granulométrica com adição de solo granular, e/ou química com incorporação de cal ou cimento, principalmente na tentativa de combater a retração.

ABSTRACT

The development of a new classification procedure for lateritic soils, which takes into account their mineralogical and physical properties and, in addition, the appropriate conceptions of the humid tropical environment, will make it possible to predict their uses in road layers with a higher percentage. The research in question evaluates the potential use of the Universal Classification Methodology of Lateritic Soils for the construction of road structures. The methodological procedure comprised a test program for the classification and evaluation of the resilient behavior of soils. Based on the resilient behavior and on the considerations on the adopted permanent deformation properties, the mechanistic-empirical analysis indicated good behavior of the analyzed soils when used in base layers in lower traffic. However, even with good conditions, the soils could need stabilization, whether granulometric with the addition of granular soil, and/or chemical with the incorporation of lime or cement, mainly in an attempt to combat shrinkage.

1. INTRODUÇÃO

As propriedades de engenharia dos solos lateríticos são especiais devido à variedade desses materiais de diferentes rochas geradoras em condições variadas de acordo com o continente e

latitude. Com isso, apresentam características geotécnicas diferentes daquelas tradicionalmente adotadas, sendo essas relacionadas à região, ao tipo de clima, a topografia, a vegetação e ao tempo de formação dos solos (Mahalinga-Iyer e Williams, 1991; Villibor *et al.*, 2009; Joel e Agbede, 2011; Portelina *et al.*, 2012; Carvalho *et al.*, 2015; Mengue *et al.*, 2017; Biswal *et al.*, 2018; Guimarães *et al.*, 2018).

A dificuldade de classificar os solos tropicais, onde o processo de laterização tem importância vital nas suas propriedades mecânicas, parece residir, na maioria das classificações, na incapacidade de se prever o comportamento desses materiais quando submetidos à ação do clima. Para a previsão do comportamento de um solo, como camada integrante de um pavimento, é necessário que se saiba se esse solo, quando em contato com a água, expande e, conseqüentemente, perde suporte; se ele é resiliente, ou seja, se apresenta deformações elásticas apreciáveis quando submetido à ação do tráfego; se ele apresenta coesão suficiente para garantir uma fácil trabalhabilidade no campo; e se ele garante a manutenção, ao longo do tempo, das características obtidas na sua compactação, etc. (Fabbri, 1994).

Segundo Villibor *et al.* (2009), duas classificações tradicionais têm sido mais usadas para obras viárias: a TRB (*Transportation Research Board*) da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e a USCS (*Unified Soil Classification System*). Essas classificações consideram fundamentais a determinação da granulometria, do limite de liquidez (LL) e do índice de plasticidade (IP). Entretanto, tais classificações chamadas tradicionais quando aplicadas para os solos típicos dos climas tropicais, resultavam em inconsistências relativamente às suas propriedades mecânicas e hídricas e, conseqüentemente, no estabelecimento de uma hierarquia para os diversos grupos.

Perante todas essas deficiências, Nogami e Villibor desenvolveram uma metodologia designada MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), específica para solos compactados tropicais. A partir dos resultados, os solos podem ser classificados, segundo seus comportamentos, em lateríticos e não lateríticos (Fabbri, 1994; Villibor *et al.*, 2009).

A classificação MCT tem como principais vantagens a ausência da necessidade do uso de considerações geológicas, geoquímicas, pedológicas, etc., para distinguir os diferentes tipos genéticos de solos tropicais; a utilização de ensaios de laboratório (tais como compactação e imersão em água), que representam, de certa forma, as situações a que os solos são submetidos quando utilizados em obras viárias; e o custo mais baixo do que os tradicionais (limite de liquidez, limite de plasticidade e granulometria), cerca de 30% (Marson, 2004). Já quanto as limitações, a MCT apresenta metodologia operacional mais trabalhosa, quando comparada aos métodos tradicionais, exigindo um dilatado tempo para a realização dos ensaios e obtenção dos parâmetros classificatórios (Fabbri, 1994; Machado *et al.*, 2016; Paiva *et al.*, 2019).

Desse modo, a partir de estudos das experiências brasileiras, portuguesas, francesas, indianas, australianas e de diferentes países de clima tropical e subtropical, Rodrigues *et al.* (2010) propuseram a Metodologia de Classificação Universal de Solos Lateríticos (CUSL). Nesse método (Figura 1), são considerados dois aspectos: em primeiro lugar, a estrutura dos solos lateríticos, sensível às variações dos níveis de temperatura e/ou solicitações mecânicas e, em segundo lugar, as propriedades físicas e mineralógicas no que diz respeito à resistência, durabilidade e plasticidade. Os solos são classificados de acordo com a sua plasticidade e granulometria em solos pedregulhosos (SLP), arenosos (SLA) ou finos (SLF). Por fim, as subdivisões são estabelecidas com base no comportamento mecânico a partir dos resultados dos ensaios de

degradabilidade, fragmentabilidade, friabilidade, capacidade de carga e limite de retração, podendo ser classificados com números que vão do 1 ao 16.

Diante desse cenário, o presente trabalho focou em avaliar o potencial uso da Metodologia de Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues *et al.* (2010), de modo a verificar a aplicabilidade do sistema proposto com o intuito de colaborar com a sua viabilidade na aplicação em camadas de pavimentos.

SOLOS LATERÍTCOS Composição Química e Gênese																		
Passante na peneira 80µm (n° 200) ≤ 30%											Passante na peneira 80µm (n° 200) > 30%							
Passante na peneira 2 mm (n° 10) ≤ 30%					Passante na peneira 2 mm (n° 10) > 30%													
SOLOS LATERÍTCOS PEDREGULHOSOS (SLP)					SOLOS LATERÍTCOS ARENOSOS (SLA)						SOLOS LATERÍTCOS FINOS (SLF)							
FR ≤ 7% & DG ≤ 7%		FR > 7% ou DG > 7%			FR > 7% & DG > 7%	VA ≤ 1,5 g/100g				VA > 1,5 g/100g	VA ≤ 3,0 g/100g				VA > 3,0 g/100g			
						FS ≤ 60%					LR ≥ 20%		LR < 20%					
CBR ≥ 60%		CBR < 60%	CBR ≥ 30%			CBR < 30%		LR ≥ 15%			LR < 15%		FS > 60%	CBR ≥ 10%		CBR < 10%	CBR ≥ 10%	CBR < 10%
SLP ₁	SLP ₂	SLP ₃	SLP ₄	SLP ₅		SLA ₆	SLA ₇	SLA ₈	SLA ₉		SLA ₁₀	SLA ₁₁	SLF ₁₂	SLF ₁₃		SLF ₁₄	SLF ₁₅	SLF ₁₆
PURO	ESTABILIZADO				PURO	ESTABILIZADO					PURO	ESTABILIZADO						
BASE [CBR ≥ 60% & ξ ≤ 0,5%] [MR ≥ 300 MPa → N ≥ 10 ⁶] [MR ≥ 400 MPa → N ≥ 10 ⁷]					BASE [CBR ≥ 60% & ξ ≤ 0,5%] [MR ≥ 300 MPa → N ≥ 10 ⁶] [MR ≥ 400 MPa → N ≥ 10 ⁷]						BASE [CBR ≥ 60% & ξ ≤ 0,5% & LR > 15%] [MR ≥ 300 MPa → N ≥ 10 ⁶] [MR ≥ 400 MPa → N ≥ 10 ⁷]							
PURO	ESTABILIZADO				PURO	ESTABILIZADO					PURO	ESTABILIZADO						
SUB-BASE [CBR ≥ 30% & ξ ≤ 1,0% & MR ≥ 200 MPa]					SUB-BASE [CBR ≥ 30% & ξ ≤ 1,0% & MR ≥ 200 MPa]						SUB-BASE [CBR ≥ 30% & ξ ≤ 1,0% & MR ≥ 200 MPa]							
					PURO	ESTABILIZADO				PURO	ESTABILIZADO							
					REFORÇO DO SUBLEITO [CBR ≥ 10% & MR ≥ 100 MPa]						REFORÇO DO SUBLEITO [CBR ≥ 10% & MR ≥ 100 MPa]							
Observações: N = número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 t; ξ = Expansão; FR = Coeficiente de Fragmentabilidade; DG = Coeficiente de Degradabilidade; FS = Coeficiente de Friabilidade; LR = Limite de retração/contração; VA = Valor de adsorção de Azul de Metileno.																		

Figura 1. Classificação Universal dos Solos Lateríticos (Adaptado de Rodrigues et al., 2010)

2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Foram analisados nove tipos de solos lateríticos (Figura 2) provenientes de jazidas localizadas em três estados brasileiros: quatro na BR-316 no Piauí (PI-1, PI-2, PI-3 e PI-4), quatro na BR-158 no Goiás (GO-1, GO-2, GO-3 e GO-4) e um na PB-008 na Paraíba (PB-1). O procedimento metodológico aplicado no trabalho iniciou com um estudo sobre a gênese dos solos, buscando-se, com o auxílio de resultados de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Fluorescência de Raios X (FRX) e Difração de Raios X (DRX), a confirmação do caráter laterítico ou não-laterítico dos materiais. Para as análises supracitadas, utilizou-se material previamente seco e passante na peneira de 80µm (n° 200). Em seguida, a caracterização e classificação dos solos lateríticos foi realizada com base na Metodologia de Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues *et al.* (2010). Os ensaios realizados para classificação dos solos são descritos em detalhes a seguir.



Figura 2. Aspecto visual dos solos analisados

2.1. Granulometria

A análise granulométrica dos solos por peneiramento foi executada com base na norma DNER-ME 080 (DNER, 1994a). A partir das informações sobre a gênese e da composição química, em pressupondo que os solos são necessariamente lateríticos de origem, a classificação é realizada em função da granulometria. Os parâmetros utilizados relacionados à granulometria são o diâmetro máximo, $D_{m\acute{a}x}$, o tamanho de $80\mu\text{m}$ (n° 200) e o tamanho de 2mm (n° 10).

2.2. Adsorção de azul de metileno (VA)

O valor da adsorção de azul de metileno foi obtido executando ensaios com base na norma NF P 94-068 (NF, 1998). O ensaio é realizado adicionando sucessivamente diferentes quantidades de azul de metileno e monitorando a adsorção após cada adição. Para isso, retira-se uma gota da suspensão e coloca-se sobre um papel de filtro, o que provoca a formação de uma mancha. A adsorção máxima é alcançada quando uma auréola azul clara persistente aparece na periferia da mancha (Figura 3). O VA é determinado sobre a fração menor que 2mm . O valor encontrado é então relacionado com a fração menor que 50mm por uma regra de proporcionalidade. Este último é denominado o valor de azul de metileno do solo, expresso em gramas de azul para 100 gramas de solo. Foram realizados três ensaios na mesma condição para cada tipo de solo.

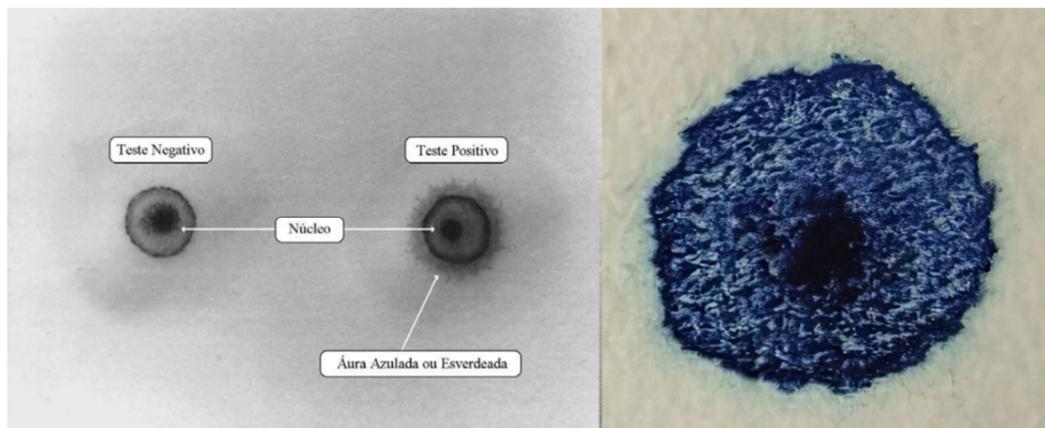


Figura 3. Mancha de Azul de Metileno (Adaptado de Fabbri, 1994)

2.3. Limite de retração/contração (LR) e grau de contração (GC)

O ensaio para determinação do limite de retração/contração seguiu a norma DNER-ME 087 (DNER, 1994b), onde deixa-se o solo secar ao ar até sensível mudança de tonalidade, secando depois em estufa até constância de peso. Após isso, mede-se a mudança no volume durante a secagem. O grau de contração ou contração volumétrica, por sua vez, é a razão da diferença entre os volumes inicial e final após a secagem da amostra, para o volume inicial, expressa em porcentagem. Foram moldadas três amostras nas mesmas condições para cada tipo de solo.

2.4. Coeficiente de fragmentabilidade (FR) e degradabilidade (DG)

O ensaio de fragmentabilidade é realizado com base na norma NF P 94-066 (NF, 1992a), e consiste em determinar a redução do D_{10} (diâmetro tal que 10% do solo, em peso, têm diâmetros menores que ele) de uma amostra de granulometria conhecida submetida a uma compactação convencional com 100 golpes de soquete Proctor normal em um molde CBR. O ensaio de degradabilidade, por sua vez, é executado seguindo a norma NF P 94-067 (NF, 1992b), e consiste em determinar a redução do D_{10} de uma amostra de granulometria conhecida submetida a quatro ciclos de imersão e de secagem convencionais. O solo, previamente preparado, é imerso em água por 8h e depois em estufa a 105°C por 16h. Os ensaios foram realizados em triplicata para cada tipo de solo.

2.5. Coeficiente de friabilidade das areias (FS)

Para a determinação do FS, empregou-se a norma NF P 18-576 (NF, 1990). O objetivo é definir a resistência à fragmentação. O ensaio consiste em medir a variação do tamanho das partículas das areias, produzida pela fragmentação em um cilindro giratório, utilizando uma carga na presença de água. A evolução do tamanho das partículas é caracterizada pela quantidade de elementos menores que 0,1 mm produzidos durante o ensaio. Os ensaios foram realizados em triplicata para cada tipo de solo.

2.6. Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado com energia Proctor intermediária de acordo com a norma DNIT-ME 164 (DNIT, 2013). Com os resultados, pôde-se determinar as curvas de compactação e, conseqüentemente, o teor ótimo de água e a massa específica seca máxima de cada solo.

2.7. Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O ensaio para a definição do CBR foi realizado seguindo as diretrizes presentes na norma DNIT-ME 172 (DNIT, 2016). Para a execução do ensaio de CBR, os corpos de prova foram moldados na situação ótima obtida no ensaio de compactação com energia Proctor intermediária. Para cada ensaio foram moldados três corpos de prova em condições semelhantes, sendo aceito aqueles cuja umidade de moldagem esteve no intervalo de $\pm 0,5$ ponto percentual em torno da umidade ótima de compactação, bem como grau de compactação entre 98% e 102% da densidade obtida no ensaio de compactação.

2.8. Módulo de resiliência (MR)

O comportamento resiliente das amostras lateríticas foi quantificado por meio do ensaio triaxial dinâmico para a determinação do módulo de resiliência dos materiais, seguindo a norma DNIT-ME 134 (DNIT, 2018). Os corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm altura foram moldados por meio de compactação em 10 camadas, na umidade ótima e peso específico seco máximo obtidos no ensaio de compactação na energia Proctor intermediária. Da mesma forma, para cada ensaio foram moldados três corpos de prova em condições semelhantes, sendo aceito aqueles cuja umidade de moldagem esteve no intervalo de $\pm 0,5$ ponto percentual em torno da umidade ótima de compactação, bem como grau de compactação entre 98% e 102% da densidade obtida no ensaio de compactação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Identificação do caráter laterítico dos solos

A composição química das amostras foi determinada por Fluorescência de Raio X (FRX). Para a identificação dos argilominerais, presentes na fração fina das amostras pesquisadas, foi utilizado o ensaio de Difração de Raio X (DRX). Por fim, a microestrutura de solos lateríticos foi observada usando-se Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com aumento de 3000x. A Figura 4 apresenta os resultados do DRX e do MEV para os solos estudados.

A análise desses difratogramas indica que os principais minerais são caulinita, quartzo, hematita (óxido de ferro) e gibbsita (hidróxido de alumínio). Já a análise das fotografias microscópicas sugerem que todas as amostras apresentam gênese laterítica, onde foram encontrados padrões que demonstram a presença de cimentação entre suas partículas, bem como padrões típicos de materiais que passaram pelo processo de laterização, com uma estrutura onde as concreções de quartzo são envolvidas por grãos menores, ligados por uma massa aparentemente amorfa, conforme constatado por Nogami e Villibor (1995).

Assim, notou-se elevada porcentagem de óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio que recobrem a caulinita conferindo ao conjunto um aspecto “cimentado”. Ademais, os grãos se apresentam ligados, arredondados e com indícios de vazios internos, formando massas esponjosas, ou com aspecto de “pipoca”, características que indicam se tratarem de solos lateríticos.

Autores como Mahalinga-Iyer e Williams (1991); Rodrigues *et al.* (2010) e Biswal *et al.* (2018), por meio de análise em difratogramas de raios X, observaram que os principais minerais presentes em amostras de solo laterítico granular são caulinita, quartzo, hematita e goethita, verificando, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que as partículas de quartzo são revestidas, em geral, com finas partículas de caulinita.

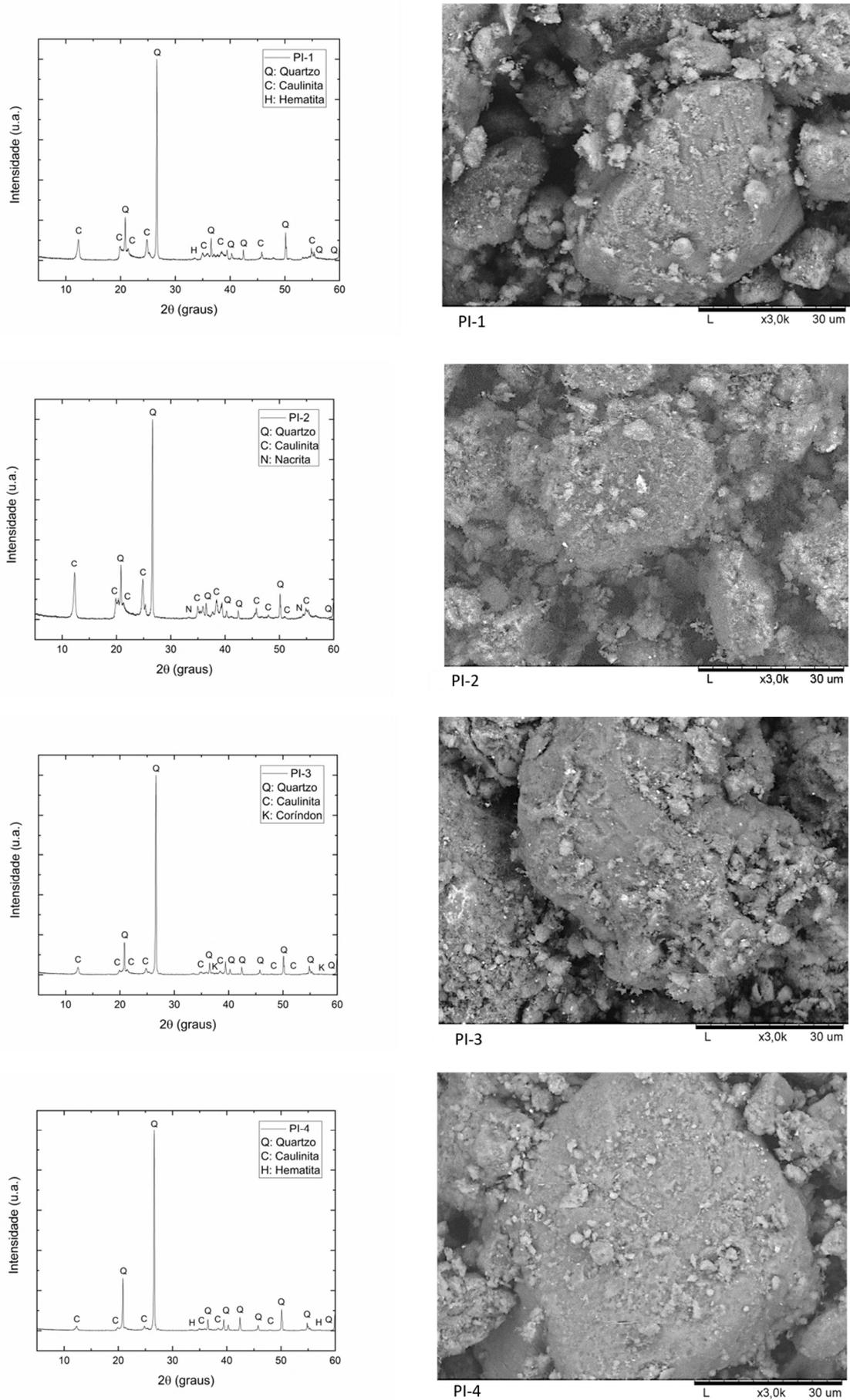
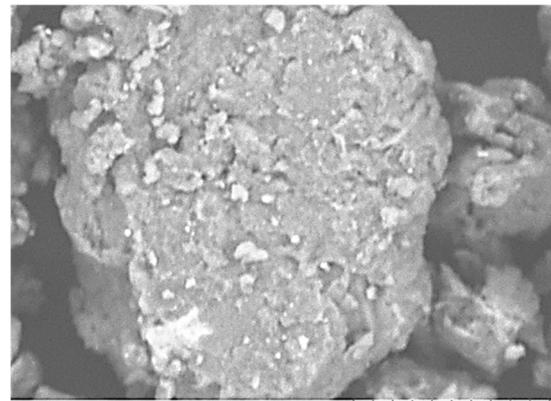
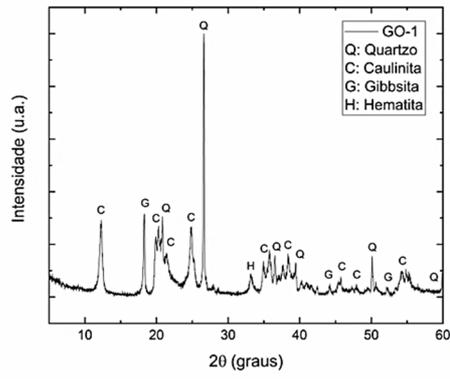
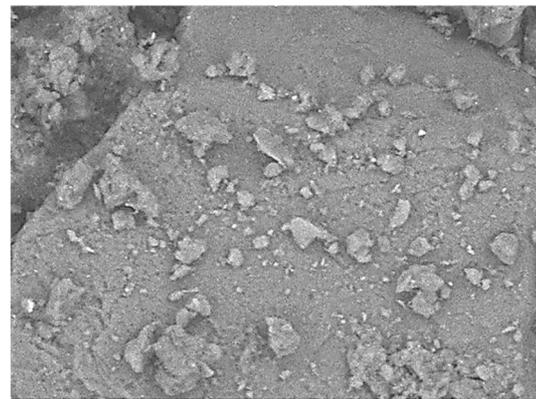
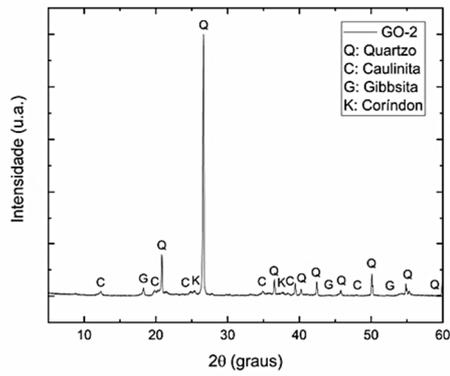


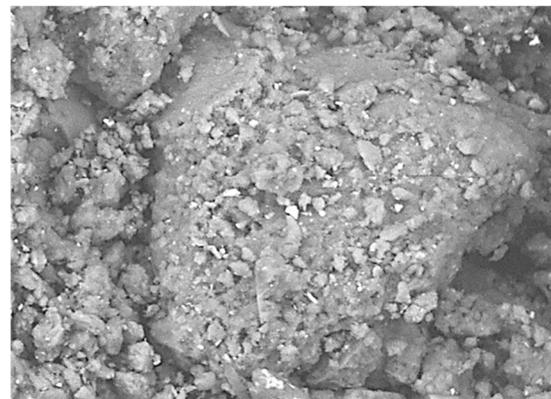
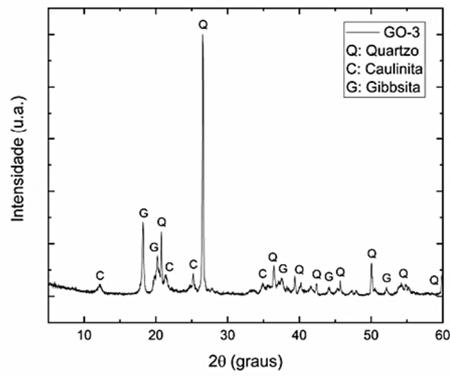
Figura 4. DRX e MEV das amostras estudadas (continua)



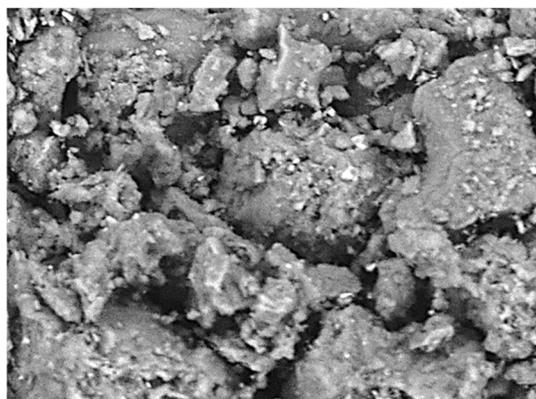
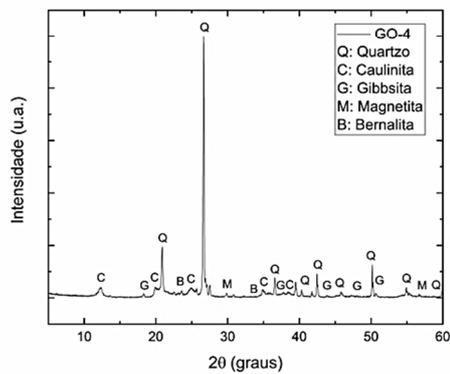
GO-1 L x3,0k 30 μm



GO-2 L x3,0k 30 μm



GO-3 L x3,0k 30 μm



GO-4 L x3,0k 30 μm

Figura 4. (continuação) DRX e MEV das amostras estudadas (continua)

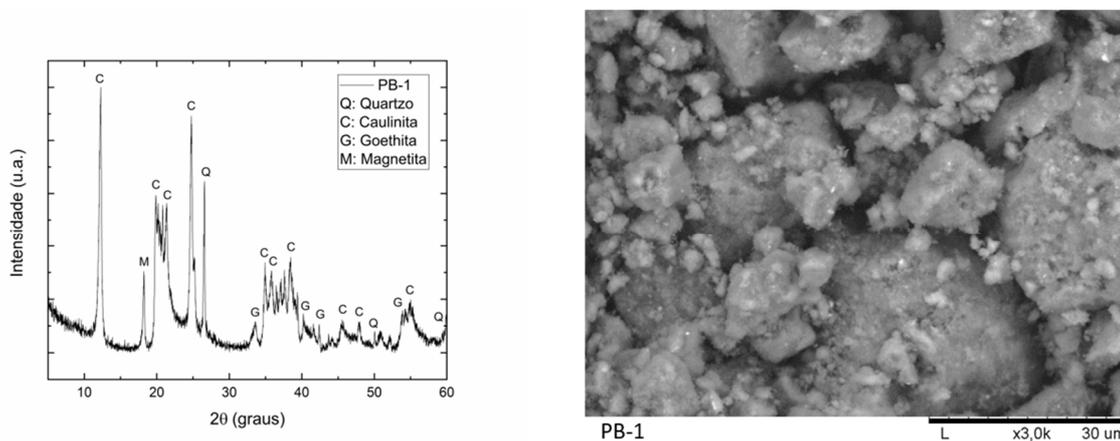


Figura 4. (continuação) DRX e MEV das amostras estudadas

Por fim, por meio dos resultados da análise química quantitativa das amostras de solo obtidos pelo ensaio FRX, foi possível verificar o teor de cada óxido e elemento químico presente nas amostras, tanto para minerais primários quanto aos secundários, como pode-se observar na Tabela 1.

Observa-se que os elementos Si, Al e Fe, considerados os constituintes básicos do processo de laterização, são os que apresentam os maiores percentuais na composição das amostras estudadas. Como era de se esperar, outros elementos tais como Mg, K, Ca e Mn, representam uma pequena parcela na composição dos solos. Isso se deve ao fato de a própria gênese e formação propiciar a deposição de alguns elementos como Al e Fe, a lixiviação do Si e manter resíduos de outros componentes resultantes do intemperismo da rocha de origem. Em suma, constata-se a presença significativa de óxidos de alumínio e ferro (Al_2O_3 e Fe_2O_3) e da sílica (SiO_2), onde esses três compostos representam, em média, 80% dos óxidos presentes nas amostras estudadas.

Tabela 1 – Análise química das amostras de solo

Amostra	Compostos (%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MgO	K_2O	CaO	MnO	Outros
PI-1	54,05	30,83	4,05	1,61	-	-	0,10	0,03	9,01
PI-2	54,09	34,11	2,42	1,17	-	0,14	-	-	7,99
PI-3	58,08	23,17	4,51	1,03	0,59	-	-	-	12,38
PI-4	63,49	18,10	3,08	0,86	0,57	0,32	0,11	-	13,08
GO-1	36,61	38,56	8,81	1,25	-	-	0,06	-	14,14
GO-2	53,10	28,44	5,35	1,30	0,55	1,69	0,05	0,02	9,22
GO-3	38,37	39,24	7,39	2,14	0,37	0,83	0,26	-	11,20
GO-4	51,42	29,96	2,75	1,09	0,57	1,93	-	0,03	11,55
PB-1	42,29	41,09	6,48	1,98	-	-	-	-	7,71

Ao efetuar a correlação entre os resultados do FRX e os do DRX, entende-se que a sílica está intrinsecamente ligada a ocorrência de quartzo, bem como os silicatados e a caulinita são influenciados pela alumina (Al_2O_3). Do mesmo modo, é relevante mencionar que a ocorrência de minerais como gibbsita, hematita, goethita e magnetita, é influenciada pela concentração de ferro e alumínio, que então determinam as frações de coloração amarelada e avermelhada em solos lateríticos.

3.2. Análise granulométrica

Sabendo que os solos são de natureza laterítica, a etapa seguinte é obtenção dos parâmetros

granulométricos. A análise granulométrica permitiu distinguir os solos em solos lateríticos finos (SLF), arenosos (SLA) ou pedregulhosos (SLP). Os resultados da análise granulométrica dos solos por peneiramento são expressos na Tabela 2.

Para melhor entendimento, foi atribuído um código de identificação dos solos, sendo empregada a letra “F” para solos finos, “A” para arenosos e “P” para pedregulhosos, seguido de um número de 1 a 3 que representa a amostra analisada.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios e classificação granulométrica

Amostra	Jazida	Passante #80 μ m (%)	Passante #2mm (%)	Classificação	Código
PI-1	Jazida Empréstimo n° 1	46,23	99,31	SLF	F1
PI-2	Jazida Empréstimo n° 4	31,49	90,91	SLF	F2
PI-3	Jazida Sena	26,00	56,00	SLA	A1
PI-4	Jazida Chapadinha Sul	21,89	47,63	SLA	A3
GO-1	Jazida Empréstimo n° 5	59,00	99,00	SLF	F3
GO-2	Jazida Nezim	10,73	22,67	SLP	P1
GO-3	Jazida Antônio	3,80	10,50	SLP	P2
GO-4	Jazida São Bento	7,48	28,30	SLP	P3
PB-1	Jazida Jacumã	21,24	99,41	SLA	A2

3.3. Classificação final

Os resultados para os parâmetros mecânicos, bem como a classificação final são apresentados na Tabela 3.

A média dos valores de azul de metileno obtidos para os solos lateríticos finos foi de 1,05 g/100g de solo, enquanto que para os solos lateríticos arenosos foi de 0,49 g/100 g de solo. Esses números confirmam que as amostras finas apresentam maior argilosidade quando comparadas às amostras arenosas. Ademais, nenhum valor ultrapassou 3,00g/100g de solo, que é o limite, com base na classificação proposta por Rodrigues *et al.* (2010), na qual os solos apresentam elevada atividade. Essa é uma característica intrínseca aos solos lateríticos, que possuem como argilomineral predominante ou exclusivo a caulinita, reconhecida por possuir baixa superfície específica.

Tabela 3 – Resultados da investigação dos parâmetros mecânicos e classificação final

Código	VA (g/100g)	LR (%)	GC (%)	FS (%)	DG (%)	FR (%)	w _{ótima} (%)	$\rho_{d,máx}$ (gf/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)	Classificação final
F1	1,03	20,89	27,6	-	-	-	11,2	1,993	34	0,03	SLF12
F2	0,84	9,45	33,0	-	-	-	9,2	2,061	13	0,70	SLF14
F3	1,28	30,42	29,5	-	-	-	20,3	1,703	10	0,50	SLF12
A1	0,53	20,67	23,6	48,93	-	-	6,7	2,049	30	0,87	SLA6
A2	0,43	14,59	7,4	39,64	-	-	11,3	1,979	33	0,08	SLA8
A3	0,51	14,61	20,6	50,40	-	-	5,8	2,053	60	1,03	SLA8
P1	-	-	-	-	1,02	2,20	9,3	2,090	51	0,92	SLP2
P2	-	-	-	-	1,06	1,08	8,9	2,103	53	0,94	SLP2
P3	-	-	-	-	1,07	1,15	5,4	2,154	104	0,88	SLP1

VA: Valor de adsorção de azul de metileno; LR: Limite de retração/contração; GC: Grau de contração; FR: Coeficiente de fragmentabilidade; DG: Coeficiente de degradabilidade; FR: Coeficiente de fragmentabilidade; w_{ótima}: Umidade ótima; $\rho_{d,máx}$: Massa específica seca máxima; MR: Módulo de resiliência.

Em relação a retração/contração dos solos, foi verificado que quanto maior a concentração da fração argilosa (<0,002 mm), maior será sua tendência de contração volumétrica, corroborando com os resultados de Pitta (1985); Albrecht e Benson (2001) e Sadeeq *et al.* (2014).

Kleppe e Olson (1985) indicaram que trincas podem começar a aparecer com contração volumétrica de 4 a 5%, e em torno de 10% podem desenvolver trincas severas. Joel e Agbede (2011) mostraram que o uso de areia e/ou adição de cimento resulta na estabilização econômica de um solo laterítico para reduzir a retração e torná-lo adequado para a camada de base. De acordo com Bernucci *et al.* (2010), para que o solo seja estabilizado com cimento de forma econômica o mesmo deve conter porção de areia, pois caso tenha um teor muito elevado de argila pode exigir um aumento considerável de cimento e apresentar elevada retração.

Os solos arenosos apresentaram valores de coeficiente de friabilidade inferiores a 60%, que é o limite superior recomendado pela norma NF P 18-576 (NF, 1990). Ademais, os solos lateríticos pedregulhosos basicamente não apresentaram degradabilidade e fragmentabilidade. Desse modo, os solos granulares se mostraram estáveis, prevendo resistência quando, por exemplo, forem submetidos à ação combinada de agentes climáticos ou hidrogeológicos e/ou quando submetidos a tensões mecânicas.

Em suma, com base nos limites expostos na Metodologia de Classificação Universal de Solos Lateríticos, observou-se que os solos laterítico finos apresentaram baixos valores de adsorção de azul de metileno (abaixo de 1,5) e LR acima de 20%. A exceção é o solo F2, que teve retração abaixo de 10%, denotando pior classificação. Os solos lateríticos arenosos apresentaram valores mais baixos de adsorção de azul de metileno, como era de se esperar devido a menor quantidade de grãos passante na peneira #80 μ m. Além disso, mostraram valores relativamente baixos de friabilidade (abaixo de 60%). Valores de limites de retração/contração também foram levemente mais baixos, a ressalva foi o solo A1 que apresentou LR acima de 20%, apontando melhor classificação. Finalmente, os solos lateríticos pedregulhosos exibiram os maiores valores de CBR, com ênfase no solo P3, que apresentou CBR maior que 100%. Entretanto, todos apresentaram valores de expansão próximos de 1%.

3.4. Comportamento resiliente

Em relação ao comportamento resiliente, os valores de MR médio, os parâmetros k e os respectivos valores de R² são expostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Modelos e respectivos valores dos coeficientes de regressão para as amostras

Código	MR	MR = k ₁ · $\sigma_3^{k_2}$			MR = k ₁ · $\sigma_d^{k_2}$			MR = k ₁ · $\sigma_3^{k_2}$ · $\sigma_d^{k_3}$			
	(MPa)	k ₁	k ₂	R ²	k ₁	k ₂	R ²	k ₁	k ₂	k ₃	R ²
F1	788	833,01	0,0248	0,01	615,38	-0,104	0,27	973,3	0,3617	-0,3579	0,89
F2	932	1311,14	0,1244	0,26	915,04	-0,003	0,01	1551,3	0,3917	-0,2637	0,89
F3	330	106,99	-0,3645	0,31	97,79	-0,502	0,87	169,75	0,3800	-0,7403	0,98
A1	376	566,92	0,1505	0,30	370,37	0,0007	0,01	699,00	0,4564	-0,2947	0,86
A2	451	772,04	0,1965	0,40	466,79	0,0244	0,01	944,68	0,5175	-0,3169	0,94
A3	574	704,06	0,0742	0,18	540,29	-0,0242	0,03	812,96	0,2992	-0,2208	0,95
P1	522	801,10	0,1564	0,35	531,30	0,0148	0,01	947,21	0,4147	-0,2538	0,81
P2	550	1662,22	0,4026	0,89	853,68	0,2125	0,37	1923,78	0,5758	-0,1535	0,97
P3	344	842,58	0,3263	0,79	468,49	0,1513	0,26	1029,56	0,5438	-0,1855	0,92

Quando relacionados a cada uma das variáveis de tensão, os dados experimentais apresentam dispersão significativa, indicando que nenhuma dessas variáveis de tensão pode, por si só, descrever completamente o comportamento. Já para o modelo composto, foram obtidos melhores ajustes, onde todos os coeficientes de determinação (R²) foram iguais ou superiores a 0,81.

O modelo composto apresenta melhores resultados para representar a variação do módulo de resiliência com as tensões atuantes no solo; porque considera, tanto a tensão de confinamento (σ_3) quanto a tensão de desvio (σ_d).

Sabe-se que tensão de desvio é responsável pelas deformações angulares no material, enquanto a tensão de confinamento é responsável pelas deformações volumétricas no material. Por isso, o modelo composto é de grande abrangência, pois nele são levadas em conta todas as tensões que causam deformações no corpo de prova (Viana, 2007; Fall *et al.*, 2008; Pascoal, 2020; Freitas *et al.*, 2020; Jose *et al.*, 2022).

Os resultados de MR mostram que, para os solos lateríticos finos, o módulo de resiliência tende a decrescer com os valores de tensão desvio. Para os solos lateríticos arenosos e pedregulhosos, por sua vez, o módulo de resiliência aumenta com a tensão de confinamento e varia relativamente pouco com a tensão desvio.

Isso ocorre, pois os campos eletromagnéticos entre as partículas dos solos finos coesivos são vencidos por deformações cisalhantes, desse modo a tensão de desvio é mais significativa. Da mesma forma, com o aumento das deformações volumétricas, aumenta o atrito entre as partículas nos solos granulares, explicando o aumento de MR com a tensão confinante. Já nos solos lateríticos, a cimentação das partículas produzida pela laterização tem o efeito de reduzir a dependência de MR com estado de tensões. Ao mesmo tempo, o próprio valor do módulo tende a aumentar, juntamente com a resistência (DNIT, 2006; Oliveira, 2007; Kumar e George, 2018; Serra *et al.*, 2020).

Em outras palavras, existe uma variação do módulo de resiliência com o estado de tensões. Entretanto, os resultados obtidos sugerem que não há correspondência direta entre a qualidade de ajuste dos modelos σ_3 e σ_d (aqui representada pelo valor do parâmetro R^2) e a predominância granulométrica das amostras. As exceções são os solos F3, P2 e P3, nos quais apresentaram R^2 consideráveis (maiores que 0,75). Isso possivelmente é explicado pelo fato do solo F3 apresentar maior quantidade de finos e maior VA, e os solos P2 e P3 apresentam menor quantidade de finos e degradabilidade praticamente nula, o que evita diminuição da granulometria quando submetido a cargas de compactação.

Os valores de MR obtidos podem ser considerados elevados, pois as nove amostras correspondem a solos compactados com energia Proctor intermediária. Guimarães (2009) mostra que solos arenosos lateríticos na condição de base do pavimento pode ter módulo resiliente variando entre 220 a 300 MPa. Gomes *et al.* (2018), por sua vez, verificaram que solos argilosos lateríticos apresentam aproximadamente módulo resiliente na faixa entre 354 e 358 MPa. Pascoal (2020) obtiveram valores de MR entre 162 e 213 MPa para solos argilosos lateríticos compactados na energia Proctor intermediária. Serra *et al.* (2020), para solos arenosos lateríticos compactados na energia Proctor modificada, encontraram valores de MR médio 411 e 532 MPa. Por fim, Osten (2018) afirma que para emprego em camadas de pavimento, o solo arenoso fino laterítico apresenta tipicamente um valor de módulo de resiliência entre 100 a 500 MPa.

3.5. Análise mecânica-empírica

Não foram executados ensaios de deformação permanente, todavia foi elaborada uma análise mecânica-empírica considerando ponderações com algumas limitações de propriedades, seguindo os preceitos da metodologia presente no MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos). Os parâmetros de deformação permanente (Tabela 5) utilizados para a análise foram adotados conforme Guimarães (2009).

Tabela 5 – Parâmetros de deformação permanente utilizados (Adaptado de Guimarães, 2009)

Procedência	Classificação	$\epsilon_p^{esp}(\%) = \Psi_1(\sigma_3)^{\Psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\Psi_3} \cdot (N)^{\Psi_4}$				R ²	Solos aplicados
		Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4		
Argila	LG'	0,206	-0,24	1,34	0,038	0,986	F1, F2 e F3
Areia Argilosa	LG'	0,643	0,093	1,579	0,055	0,909	A1, A2 e A3
Laterita	Pedregulho	0,105	0,839	-0,014	0,041	0,939	P1, P2 e P3

A estrutura e as propriedades dos materiais constituintes do pavimento foram adotadas com base no trabalho realizado por Silva (2021) na BR-230 no estado da Paraíba (Tabela 6). Ficou definida como 12,5 cm de revestimento em CA com CAP 50/70, 20 cm de base, 20 cm de sub-base e subleito com espessura semi-infinita. Adotou-se como carga padrão 8,2 toneladas por eixo com período de projeto de 10 anos. Para o proposto dimensionamento foram considerados volumes de tráfego diferentes: O caso 1 considerou o número $N = 10^6$ e o caso 2 considerou $N = 10^7$. Foram analisadas nove estruturas com o objetivo de avaliar o desempenho dos solos ao serem aplicados na camada de base, preservando as camadas de revestimento, sub-base e subleito existentes.

Tabela 6 – Estrutura e as propriedades dos materiais constituintes do pavimento (Adaptado de Silva, 2021)

Camada	Concreto asfáltico	Sub-base	Subleito
Parâmetros			
Espessura (cm)	12,5	20	0 (semi-infinita)
Coeficiente de Poisson	0,30	0,35	0,45
Módulo (MPa)			
Modelo constituinte	Resiliente Linear	Resiliente Não Linear	Resiliente Não Linear
Módulo (MPa)	6801	-	-
Coeficiente de Regressão (k1)	-	1088,49	882,77
Coeficiente de Regressão (k2)	-	0,539	0,451
Coeficiente de Regressão (k3)	-	-0,106	-0,072
Características			
Tipo de material	CAP 50/70	Material granular	Subleito
Massa específica (g/cm ³)	2,4	2,1	1,83
Umidade ótima (%)	-	9,2	11,8
Energia de compactação	-	Intermediária	Normal
Resistência à tração (MPa)	1,16	-	-
Teor de asfalto (%)	4,7	-	-
Volume de vazios (%)	3,3	-	-
Faixa granulométrica	B	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	30	-	-
Curva de fadiga			
Modelo	$k1 \cdot (e^t)^{k2}$	-	-
Coeficiente de Regressão (k1)	5E-12	-	-
Coeficiente de Regressão (k2)	-3,395	-	-
Deformação permanente			
Modelo	-	$\Psi_1(\sigma_3)^{\Psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\Psi_3} \cdot (N)^{\Psi_4}$	-
Coeficiente de Regressão (Ψ_1)	-	0,27	0,244
Coeficiente de Regressão (Ψ_2)	-	-0,14	0,419
Coeficiente de Regressão (Ψ_3)	-	1,33	1,309
Coeficiente de Regressão (Ψ_4)	-	0,06	0,069

Os resultados do afundamento de trilha de roda (ATR) e do percentual de área trincada (AT) obtidos por meio da análise no MeDiNa estão expostos na Figura 5.

Em todas as análises considerou-se a vida como “Sistema Arterial Principal”. As rodovias desse tipo são caracterizadas por alto nível de mobilidade e volume de tráfego, proporcionando ao usuário velocidades de 60 a 120 km/h, típico da rodovia na qual está localizada a praça de

pedágio em questão (Pascoal, 2020). O nível de confiabilidade das análises realizadas pelo Me-DiNa foi de 95%, com isso, o critério de aceitação do dimensionamento passa a ser 30% de área trincada e 10 mm de deformação permanente.

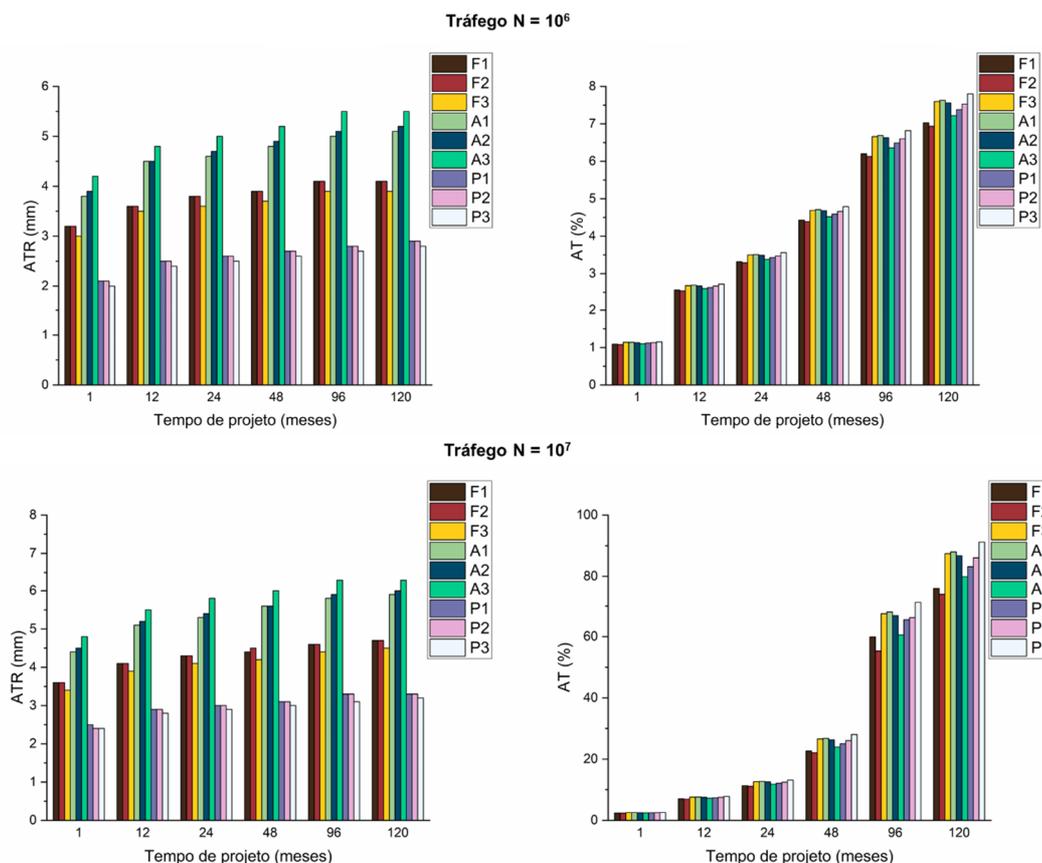


Figura 5. Desempenho frente ao afundamento de trilha de roda (ATR) e porcentagem de área trincada (AT)

A *Federal Highway Administration* classifica o ATR em três níveis de gravidade, sendo baixo quando entre 6 e 12,5 mm, médio entre 12,5 e 25 mm, e alto quando maior que 25 mm (Hafeez, 2009). Medina e Motta (2015) sugerem o valor de 13 mm de ATR como referência para rodovias com alto volume de tráfego, admitindo um valor máximo de 16 mm. Nos métodos de dimensionamento mecânico, admite-se os valores entre 10 e 20 mm para ATR. Segundo Silva (2008), os valores críticos de ATR em relação ao risco de hidroplanagem são de 12 mm a 15 mm para as velocidades de 120 km/h e 80 km/h, respectivamente.

Ao avaliar as estruturas que foram dimensionadas para tráfego menor ($N = 10^6$), o desempenho foi muito satisfatório, visto que o afundamento de trilha de roda e a porcentagem de área trincada, ao final da vida útil, estão bem abaixo dos limites requisitados ao tipo da via. Tais resultados evidenciam o bom comportamento dos solos investigados neste trabalho quando empregado em camadas de base de pavimentos.

No cenário de maior tráfego ($N = 10^7$), ao concluir a verificação, o programa emitiu o alerta de tráfego elevado, indicando que o mecanismo de ruptura foi a fadiga oriunda da repetição de deformações elásticas. Contudo, a deformação permanente resultante do acúmulo de deformações plásticas permanece dentro do limite nos 10 anos.

Tais dados corroboram os resultados obtidos por Pascoal (2020), onde as análises verificaram que estruturas compostas com solos lateríticos dimensionadas a resistir a $1,0 \times 10^6$ ao longo

dos dez anos, não sofreriam com nenhum dos mecanismos de deterioração. Entretanto, estruturas dimensionadas com o número de solicitações de $2,50 \times 10^7$, o mecanismo de ruptura foi a fadiga.

Vale salientar que os preceitos da metodologia presente no MeDiNa não consideram dados de retração dos solos. A retração pode gerar fissuras longitudinais, devido ao inchamento do solo em períodos de chuvas intensas, e fissuras transversais relacionadas à resistência à tração dos materiais, em períodos de seca (Carvalho *et al.*, 2015). Portelinha *et al.* (2012) mostraram que a adição de 2% e 3% de cal ou cimento foi suficiente para alterar a trabalhabilidade e resistência mecânica do solo. Ademais, observaram, por meio de análises mecanistas, que a modificação do solo pode ser aplicada ao projeto de base de pavimentos flexíveis produzindo baixos níveis de deformação elástica e tensões.

Desse modo, os solos estudados, mesmo apresentando boas condições quando aplicados principalmente em situações de menor tráfego ($N = 10^6$), poderiam necessitar de estabilização, seja granulométrica com adição de solo granular (areia, por exemplo), e/ou química com incorporação de cal ou cimento, principalmente na tentativa de combater a retração.

4. CONCLUSÕES

A proposta de um novo procedimento de classificação de materiais de construção, levando em consideração projetos adequados ao ambiente tropical úmido, a natureza e os parâmetros de estado associados ao comportamento mecânico, deve permitir prever o uso de solos tropicais em camadas de pavimento.

A Metodologia de Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues *et al.* (2010) mostrou potencial para o emprego de solos lateríticos naturais ou estabilizados em camadas de pavimentos, visto que leva em consideração as concepções apropriadas do meio ambiente tropical e o processo de laterização, bem como as propriedades mecânicas inerentes às composições químicas dos sistemas lateríticos.

O modelo composto apresentou melhores resultados para representar a variação do módulo de resiliência com as tensões atuantes no solo, pois nele são consideradas todas as tensões que causam deformações no corpo de prova. Além disso, os resultados de módulo de resiliência obtidos foram elevados, com valores acima de 300 MPa quando compactados na energia Proctor intermediária.

Com base no comportamento resiliente e as ponderações sobre as propriedades de deformação permanente adotadas conforme Guimarães (2009), a análise mecanística-empírica indicou bom comportamento dos solos analisados quando empregado em camadas de base em tráfegos menores ($N = 10^6$). Entretanto, os solos poderiam necessitar de estabilização, seja granulométrica com adição de solo granular (areia, por exemplo), e/ou química com incorporação de cal ou cimento, principalmente na tentativa de combater a retração.

Desse modo, fica nítido que a utilização de solos tropicais na construção de rodovias requer uma visão mais ampla do que aquela especificada por padrões tradicionais e conhecimentos estabelecidos a partir de estudos de solos de clima frio e temperado. Desse fato, o conhecimento em particular das possibilidades e dos limites dos materiais presentes em países de clima tropical e subtropical, podem auxiliar a resolver os problemas impostos e a escolher as soluções mais econômicas para a construção de infraestruturas rodoviárias.

REFERÊNCIAS

- Albrecht, B. A. e Benson, C. H. (2001) Effect of Desiccation on Compacted Natural Clays. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, v. 127, n. 1, p. 67-75. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:1\(67\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:1(67)).
- Bernucci, L. B.; L. M. G. Motta; J. A. P. Ceratti e J. B. Soares (2010) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro, RJ.
- Biswal, D. R.; U. C. Sahoo e S. R. Dash (2018) Mechanical characteristics of cement stabilised granular lateritic soils for use as structural layer of pavement. *Road Materials And Pavement Design*, v. 21, n. 5, p. 1201-1223. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2018.1545687>.
- Carvalho, J. C.; L. R. Rezende; F. B. F. Cardoso; L. C. F. L. Lucena; R. C. Guimarães e Y. G. Valencia (2015) Tropical soils for highway construction: peculiarities and considerations. *Transportation Geotechnics*, v. 5, p. 3-19. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.10.004>.
- DNER (1994a) DNER-ME 080: Solos – análise granulométrica por peneiramento – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*.
- DNER (1994b) DNER-ME 087: Solos – determinação dos fatores de contração – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*.
- DNIT (2006) Manual de Pavimentação Rodoviária. Publicação IPR 719. Diretório de Planejamento e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias. (3ª ed.). *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2013) DNIT-ME 164: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*.
- DNIT (2016) DNIT-ME 172: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro: *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*.
- DNIT (2018) DNIT-ME 134: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*.
- Fabbri, G. T. P. (1994) *Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno*. Tese (doutorado). Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. DOI: 10.11606/T.18.1994.tde-06112012-104943.
- Fall, M.; A. Sawangsuriya; C. H. Benson; T. B. Edil e P. J. Bosscher (2008) On the Investigations of Resilient Modulus of Residual Tropical Gravel Lateritic Soils from Senegal (West Africa). *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 26, n. 1, p. 13-35. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-007-9144-5>.
- Freitas, J. B.; Rezende, L. R.; Gitirana Junior e F. N. Gilson (2020) Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions, *Engineering Geology*, v. 270, p. 1-14. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/j-enggeo.2020.105580](http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105580).
- Gomes, M. S.; A. R. Guimarães e M. E. S. Marques (2018) Estudo da influência do tipo de finos no comportamento resiliente de solos tropicais para uso em pavimentos. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.9, n.5, p.78-87. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.005.0008>.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: < <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/153-2009/1199-antonio-carlos-rodrigues-guimaraes> > (acesso em 27/08/2022).
- Guimarães, A. C. R.; L. M. G. Motta e C. D. Castro (2018) Permanent deformation parameters of fine – grained tropical soils. *Road Materials And Pavement Design*, v. 20, n. 7, p. 1664-1681. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2018.1473283>.
- Hafeez, I. (2009) *Impact of hot mix asphalt properties on its permanent deformation behavior*. Tese (Doutorado). Department of Civil Engineering and Environmental Engineering, University of Engineering and Technology Taxila, Disponível em: <<http://prp.hec.gov.pk/jspui/handle/123456789/354>> (acesso em 17/10/2022).
- Joel, M. e I. O. Agbede (2011) Mechanical-Cement Stabilization of Laterite for Use as Flexible Pavement Material. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, v. 23, n. 2, p. 146-152. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)mt.1943-5533.0000148](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)mt.1943-5533.0000148).
- Jose, A.; J. M. Krishnan e R. G. Robinson (2022). Resilient and Permanent Deformation Response of Cement-Stabilized Pond Ash. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, v. 34, n. 1, p. 1-13. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)mt.1943-5533.0004044](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)mt.1943-5533.0004044).
- Kleppe, J. H. e R. E. Olson (1985) Desiccation Cracking of Soil Barriers. *Hydraulic Barriers In Soil And Rock*, p. 263-275, ASTM International. DOI: <http://dx.doi.org/10.1520/stp34583s>.
- Kumar, A. e V. George (2018) Effect of Soil Parameters on Resilient Modulus Using Cyclic Tri-Axial Tests on Lateritic Subgrade Soils from Dakshina Kannada, India. *Geotechnical And Geological Engineering*, v. 36, n. 6, p. 3987-4000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-018-0550-7>.
- Machado, A. C.; L. D. Ferreira; B. O. Couto; R. A. C. Filgueiras e R. R. Souza (2016) Estudo Comparativo entre a Classificação MCT e os Sistemas Tradicionais de Classificações Geotécnicas para Solos Brasileiros, *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2016*, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ABMS. DOI: <http://dx.doi.org/10.20906/cps/cb-01-0104>.
- Mahalinga-Iyer, U. e D. J. Williams (1991) Engineering properties of a lateritic soil profile. *Engineering Geology*, v. 31, n. 1, p. 45-58. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952\(91\)90056-q](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952(91)90056-q).

- Marson, M. (2004) *Análise crítica da classificação MCT para solos tropicais*. Dissertação (mestrado). Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Infraestrutura de Transportes, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. São Paulo. Disponível em: <http://www.bd.bibl.it.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=112> (acesso em 20/03/2022).
- Medina, J. e L. M. G. Motta (2015) *Mecânica dos Pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 638 p.
- Mengue, E.; H. Mroueh; L. Lancelot e R. M. Eko (2017) Mechanical Improvement of a Fine-Grained Lateritic Soil Treated with Cement for Use in Road Construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n. 11, p. 04017206. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)mt.1943-5533.0002059](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)mt.1943-5533.0002059).
- NF (1990) NF P 18-576: Granulats – Mesure du coefficient de friabilité des sables. Saint-Denis: *Norme Française*
- NF (1992a) NF P 94-066: Sols: reconnaissance et essais – Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux. Saint-Denis: *Norme Française*.
- NF (1992b) NF P 94-067: Sols: reconnaissance et essais – Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux. Saint-Denis: *Norme Française*.
- NF (1998) NF P 94-068: Sols: Reconnaissance et essais – Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache. Saint-Denis: *Norme Française*.
- Nogami, J. S. e D. F. Villibor (1995) *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. São Paulo: Editora Villibor, 240 p.
- Oliveira, J. C. (2007) *Indicadores de Potencialidades e Desempenho de Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Pavimentos Flexíveis*. Tese (doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/5509>> (acesso em 19/03/2022).
- Osten, F. B. Von Der. (2018) *Avaliação de quatro solos tropicais para sublastro da estrada de ferro Carajás*. Dissertação (mestrado). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<https://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/1/885>> (acesso em 12/08/2022).
- Paiva, M. C.; A. P. Silva; V. O. Kuhn e O. H. Menéndez (2019) Caracterização de um solo arenoso fino laterítico para base de pavimentos. *RCT - Revista de Ciência e Tecnologia*, v. 5, n. 8. DOI: <https://doi.org/10.18227/rct.v5i8.5397>.
- Pascoal, P. T. (2020) *Estudo da influência da compactação no comportamento resiliente e deformação permanente de solo laterítico do Rio Grande do Sul*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22210>> (acesso em 25/06/2022).
- Pitta, M. R. (1985) *Retração de solo-cimento*. ABCP, 63 p., São Paulo, SP.
- Portelinha, F. H. M.; D. C. Lima; M. P. F. Fontes e C. A. B. Carvalho (2012) Modification of a Lateritic Soil with Lime and Cement: An Economical Alternative for Flexible Pavement Layers, *Soils and Rocks*, v. 35, n. 1, p. 51-63. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. DOI: <http://dx.doi.org/10.28927/sr.351051>.
- Rodrigues, J. K. G.; M. Ndiaye; P. Reiffsteck e J. C. Aurio (2010) Rationalisation de l'Utilisation des Sols Latéritiques en Plate-forme de Chaussées Durables et de Faible Coût. In: *XXVIII^e Rencontres Universitaires de Génie Civil*, p. 1-10. La Bourboule. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00508850>> (acesso em 22/01/2022).
- Sadeeq, J. A.; J. Ochepe e A. B. Salahudeen (2014) Effect of used oil contamination on the volumetric shrinkage of lateritic soils. *Proceedings of the Third International Conference on Engineering and Technology Research*, p. 167-175. Ladoke Akintola University of Technology, Ogbomosh, Nigeria.
- Serra, G. A.; A. C. R. Guimarães; M. E. S. Marques e C. D. Castro (2020) Estudo do comportamento resiliente de cinco solos finos da ilha de São Luís para fins de pavimentação. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 5, p. 376-389. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.005.0035>.
- Silva, C. C. V. P. (2021) *Estudo e proposição de solução para segmento crítico na rodovia BR-230/PB com aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos - MeDiNa*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/18428>> (acesso em 25/06/2022).
- Silva, J. P. S. (2008) *Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários*. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/3470>> (acesso em 12/09/2022).
- Viana, H. M. F. (2007) *Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do Estado de São Paulo*. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-07042008-111017/pt-br.php>> (acesso em 25/06/2022).
- Villibor, D. F.; J. S. Nogami; J. R. Cincerre; P. R. M. Serra e A. Z. Neto (2009) *Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas – Bases Alternativas com Solos Lateríticos Gestão de Manutenção de Vias Urbanas*. 2^a ed. Arte & Ciência, São Paulo, SP.