

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS E RESILIENTES DE SOLOS DE TALUDES AO LONGO DO TRAÇADO DA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS PARA FINS DE UTILIZAÇÃO EM INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

Mayssa Alves da Silva Sousa¹
Antonio Carlos Rodrigues Guimarães²
Carmen Dias Castro³

Resumo: Obras de infraestrutura requerem materiais nem sempre disponíveis. Buscar jazidas próximas ao local da obra e o estudo geotécnico dos solos são imprescindíveis. Este artigo analisa as características geotécnicas e resilientes de solos originários de dez taludes de cortes da Estrada de Ferro Carajás (EFC), entre os estados do Pará e Maranhão (Brasil). Pesquisou-se a ocorrência de solos ao longo dessa faixa, para fins de aplicação na duplicação da EFC e em obras futuras. Fez-se ensaios de limites de consistência, granulometria, compactação, MEV, espectrometria de raios X e Módulo de Resiliência (MR), além das classificações geotécnicas. Identificou-se a presença de solos arenosos finos com comportamento laterítico e MR satisfatórios, podendo ser usados em camadas de pavimentos.

Palavras-chave: Solos Tropicais. Solos finos. Pavimentos. Transportes. Infraestrutura.

GEOTECHNICAL AND RESILIENT CHARACTERISTICS OF TALUDES SOILS ALONG OF THE CARAJÁS RAILWAY FOR PURPOSES OF USE IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Abstract: Infrastructure works require materials that are not always available. Searching for deposits near the construction site and the geotechnical study of the soils are essential. This article analyzes the geotechnical and resilient characteristics of soils originating from ten cut slopes of the Carajás Railway (EFC), between the states of Pará and Maranhão (Brazil). The occurrence of soils along this track was investigated, for application purposes in the duplication of the EFC and in future works. Consistency limits, granulometry, compaction, SEM, X-ray spectrometry and Resilience Module (MR) tests were performed, in addition to geotechnical classifications. The presence of fine sandy soils with satisfactory lateritic behavior and MR was identified, which can be used in pavement layers.

Keywords: Tropical soils. Fine-grained soils. Pavement. Transport. Infrastructure.

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS Y RESILIENTES DE LOS SUELOS DE TALUDES A LO LARGO DEL FERROCARRIL CARAJÁS PARA FINES DE USO EN INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE

Resumen: Las obras de infraestructura requieren materiales que no siempre están disponibles. La búsqueda de depósitos cercanos al sitio de construcción y el estudio

¹ Instituto Militar de Engenharia - IME, Departamento de Engenharia de Transportes, Rio de Janeiro, Brasil, mayssa.geotecnia@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3513-9534>

² Instituto Militar de Engenharia - IME, Departamento de Engenharia de Transportes, Rio de Janeiro, Brasil, guimaraes@ime.eb.br, <https://orcid.org/0000-0001-9244-7034>

³ Instituto Militar de Engenharia - IME, Departamento de Engenharia de Transportes, Rio de Janeiro, Brasil, carmendc14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5514-718X>

geotécnico de los suelos son fundamentales. Este artículo analiza las características geotécnicas y resilientes de suelos provenientes de diez taludes de corte del Ferrocarril Carajás (EFC), entre los estados de Pará y Maranhão (Brasil). Se investigó la ocurrencia de suelos a lo largo de este rango, con el propósito de su aplicación en la duplicación del EFC y en trabajos futuros. Se realizaron pruebas de límites de consistencia, granulometría, compactación, SEM, espectrometría de rayos X y Módulo de Resiliencia (MR), además de clasificaciones geotécnicas. Se identificó la presencia de suelos arenosos finos con comportamiento laterítico y MR satisfactorios, los cuales pueden ser utilizados en capas de pavimento.

Palabras clave: Suelos tropicales. Suelos finos. Pavimento. Transporte. Infraestructura.

Introdução

O pavimento ferroviário, assim como o rodoviário, é um sistema constituído de múltiplas camadas que fornecem o suporte necessário ao transporte, porém, para que este seja realizado de forma segura, o pavimento precisa ser composto por materiais dotados de bom comportamento geotécnico.

Para tanto, percebe-se que para a elaboração de projetos de pavimentação, é de suma importância, a investigação de ocorrência de materiais, pois a descoberta de jazidas de solos com localização próxima à obra representa diminuição do custo de transporte e, conseqüentemente, da obra. Há casos nos quais a própria obra pode ser viabilizada por causa do uso de materiais locais.

Além disso, mapas geológicos ou pedológicos disponíveis não cobrem a necessidade de detalhamento de jazidas para fins de emprego em infraestrutura de transportes, de maneira que tal tipo de serviço é essencial para obras locais.

Entretanto, os procedimentos atualmente utilizados como critério de aceitação dos solos para uso em pavimentação são dotados de parâmetros que não se adequam totalmente à realidade dos solos brasileiros, pois baseiam-se em normas desenvolvidas para solos de países de clima temperado, desta maneira uma grande parte dos solos disponíveis são descartados.

NOGAMI & VILLIBOR (2009) afirmam que “tais normas resultaram, basicamente, de estudos do comportamento de rodovias e pistas experimentais situadas nos Estados Unidos da América (USA) e envolvem a fixação de condições empíricas válidas para os ambiente e solos mais representativos daquele país”.

São usualmente considerados os sistemas de classificação convencionais que são: USCS (traduzido como Sistema Unificado de Classificação dos Solos) e TRB (sistema de classificação da *Transportation Research Board*), e são fixados

ainda, valores mínimos de CBR (*California Bearing Ratio* ou Índice de Suporte Califórnia - ISC) e Índice de Plasticidade - IP, assim os materiais que atendem a essas especificações estão cada vez mais escassos.

Sendo válido ressaltar que as classificações e os parâmetros supracitados não consideram as peculiaridades relacionadas com as condições e com os solos mais frequentes no Brasil, onde, tanto os solos quanto os climas predominantes, podem ser englobados, genericamente, como do tipo “tropical úmido”, conforme colocado por NOGAMI & VILLIBOR (2009).

MARANGON (2004) afirma que as peculiaridades dos solos de ambientes tropicais, quentes e úmidos, justificam o sucesso da pavimentação com o uso de materiais alternativos como no caso do solo fino laterítico, resultando em baixo custo.

Neste contexto, percebe-se a necessidade de ampliar a realização de pesquisas sobre o uso de solos tropicais, típicos do Brasil, como camada de pavimentos, pautados em análises mais modernas como o comportamento resiliente e em metodologias específicas para solos tropicais, como a MCT (M - miniatura; C - compactação; T – tropical), independente dos seus valores de CBR e de sua classificação.

Dentre alguns pesquisadores que tem estudado o comportamento geotécnico dos solos tropicais, incluindo os solos finos lateríticos pode-se citar: Nogami e Villibor (1981, 1991, 1994 e 1995), Vertamatti, 1988; Santos (1998), Chaves, 2000; Farias et al. (2002), Silva (2003), Marson (2004), Marangon, 2004; Takeda et al. (2006), Delgado, 2007; Zorzi (2008), Costa e Motta, 2007; Villibor e Nogami, 2009; Silva et al. (2012), Delgado et al., 2013; Araújo & Neto (2014), Santos & Parreira (2015), Futai & Martins (2015), Sousa, 2016; Villibor e Alves (2017), Silva Filho, 2018; Dalla Roza e Motta, 2018; Guimarães et al., 2019; Lima et al., 2020; entre outros.

A Estrada de Ferro Carajás – EFC, uma ferrovia situada entre os estados de Maranhão e Pará, devido às especificações atuais, tem apresentado grande carência de materiais para uso no seu pavimento. Em outras palavras, acontece que solos de excelente desempenho têm sido desperdiçados por causa da adoção de um critério de seleção não compatível com os solos tropicais, que por sua vez possuem ampla ocorrência ao longo da EFC. É nesse contexto que a presente pesquisa se insere, pois, diante dessa situação a VALE S.A. firmou um convênio em

parceria com o Instituto Militar de Engenharia - IME com o objetivo de realizar estudos para revisão de critérios de projeto da via permanente.

Os estudos incluíram, a pesquisa de ocorrência de materiais, dando-se preferência ao lado que estava sendo efetivamente explorado por ocasião da implantação do projeto geométrico da via duplicada. Além disso, foram executados ensaios de caracterização geotécnica tradicional e de comportamento resiliente, bem como a classificação MCT em diversos solos de jazidas e taludes de corte situados ao longo da EFC.

Como parte constituinte da Amazônia Legal, a qual inclui a porção ocidental do estado do Maranhão, muitas obras estão sendo executadas ao longo de traçados que contém cidades ou povoados pouco desenvolvidos, sem mapeamento significativo de ocorrências de recursos minerais, tal como observados em outras regiões mais desenvolvidas do país.

Neste sentido, este artigo tem como principal objetivo, analisar as características geotécnicas e resilientes dos solos situados em regiões próximas ao traçado da EFC, passíveis de serem propostos como materiais de pavimentação ferroviária.

Materiais e Métodos

Neste item serão apresentadas algumas características dos locais de ocorrência dos solos finos coletados ao longo da EFC e são indicados os ensaios de laboratório realizados e utilizados como base para a análise do comportamento geotécnico dos solos estudados, incluindo as normas que nortearam a execução dos mesmos.

É importante destacar que a pesquisa de ocorrência, se constituiu, inicialmente, no estudo preliminar dos mapas geológicos dos estados do Pará e Maranhão, porém os mesmos não descreviam bem a ocorrência de solos residuais ou transportados, se limitando a registrar coberturas lateríticas. Então, partiu-se para a consulta em mapas pedológicos, em que o resultado foi mais expressivo, pois foi possível identificar grandes ocorrências de Latossolos. Ainda assim, tal classificação (pedológica) é insuficiente para prever o comportamento do solo em obras de infraestrutura.

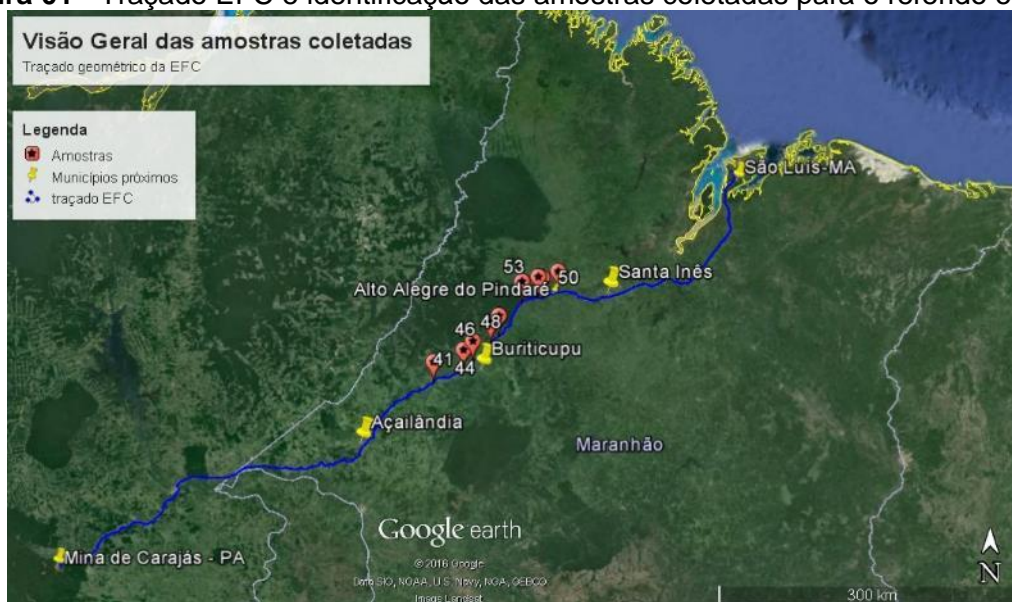
Desta forma, foi necessário percorrer toda a extensão da ferrovia, através de estradas paralelas, sendo utilizado como critérios para definição dos pontos de

estudo: taludes de cortes; colorações vermelho-amarelo; concreções e, linhas de seixos.

Descrição das Ocorrências

Aqui serão apresentados os afloramentos estudados que estão localizados próximos aos municípios de Açailândia, Buriticupu, Alto Alegre do Pindaré e Santa Inês, todos no interior do Maranhão, sendo que para a descrição dos afloramentos utilizou-se como referência os estudos contidos em Nogami & Villibor (1995). A Figura 01 apresenta o traçado geométrico de parte da EFC identificando os pontos de coleta das amostras utilizadas.

Figura 01 - Traçado EFC e identificação das amostras coletadas para o referido estudo.



Fonte: Imagem obtida através do software Google Earth.

As amostras dos solos foram identificadas numericamente como: 41, 42, 44, 46, 48, 50, 51A, 51B, 52 e 53. O resultado completo da pesquisa, que reúne 53 jazidas, pode ser visto em Sousa (2016).

A amostra 41 é constituída de um solo arenoso fino amarelo de um corte pré-existente na ferrovia ao longo do km 419, com previsão de ser alargado por ocasião da duplicação. Este solo parece ter sido utilizado na via de acesso, apresentando trincas típicas de solos lateríticos. O solo da amostra 42 também é proveniente de um corte, porém no km 385, apresentando coloração ligeiramente rosada.

O solo da amostra 44 é proveniente de um corte no km 373+540, tendo sido retirada a camada superficial solta para a realização da coleta. Surgiu, assim, um

solo arenoso fino amarelo. Para a amostra 46 tem-se um solo arenoso amarelo claro, sendo oriundo de um corte no km 348.

O talude da amostra 48 é localizado no km 337+305, constituído de um solo arenoso fino alaranjado, e apresentando linha de seixos na sua base. A escavação deste material para coleta foi muito difícil, indicando elevada coesão do solo. A amostra 50 foi coletada em um corte no km 260, também previsto para alargamento, há presença de trincas ao longo de todo o talude.

A amostra 51 é oriunda de um talude de corte de elevada altura localizado no km 274, sendo subdividido na parte A, mais elevada, e na parte B, mais baixa. A amostra 51A é composta de um solo arenoso laranja e a amostra 51B de um solo arenoso rosado. O padrão de alteração do afloramento indica tratar-se de um solo residual relativamente jovem.

A amostra 52 provém de um corte no km 281, apresentando trincas na superfície, linha de ocorrência de lateritas e linha de seixo. Trata-se de um solo arenoso fino amarelo. A amostra 53 foi coletada em um talude no km 296, sendo constituída de um solo fino vermelho.

Para cada amostra foram elaborados mapas de localização, com auxílio do software Google Earth, objetivando obter estimativas das áreas possíveis de serem exploradas em cada talude de corte, conforme observações realizadas em campo. Para ilustrar apresenta-se na Figura 02 (parte a) o mapa e polígono da amostra 51 (A e B), ao lado (Figura 02, parte b) expõe-se uma visão geral do material no local. Fotos e mais informações de cada amostra podem ser consultadas em Sousa (2016).

A Tabela 01 descreve as coordenadas UTM (Zona 23) de locação das amostras, os quantitativos das áreas estimadas para exploração e os seus respectivos perímetros. Dessa forma, tem-se aproximadamente 161.305 m² de áreas passíveis de serem exploradas, isto considerando somente os afloramentos estudados, o que indica ser uma região de grande disponibilidade de materiais.

Figura 02 - Amostra 51 (A e B) a) Localização (Google Earth) e b) Visão geral.**Tabela 01 - Coordenadas e áreas passíveis de exploração junto as amostras coletadas**

Amostra	Coordenadas UTM		Área passível de exploração (m²)	Perímetro (m)
	Norte	Este		
41	9.510.382.209	292.985.429	8.886	619
42	9.521.892.903	321.420.746	3.266	398
44	9.530.290.113	330.230.903	49.968	1.033
46	9.547.241.132	347.132.902	3.403	271
48	9.554.229.247	354.818.488	1.604	172
50	9.596.212.971	410.682.666	29.667	697
51 (A e B)	9.590.033.580	395.717.392	11.921	450
52	9.591.096.303	391.927.341	4.375	379
53	9.586.701.879	376.532.397	48.215	933
TOTAL			161.305	4.952

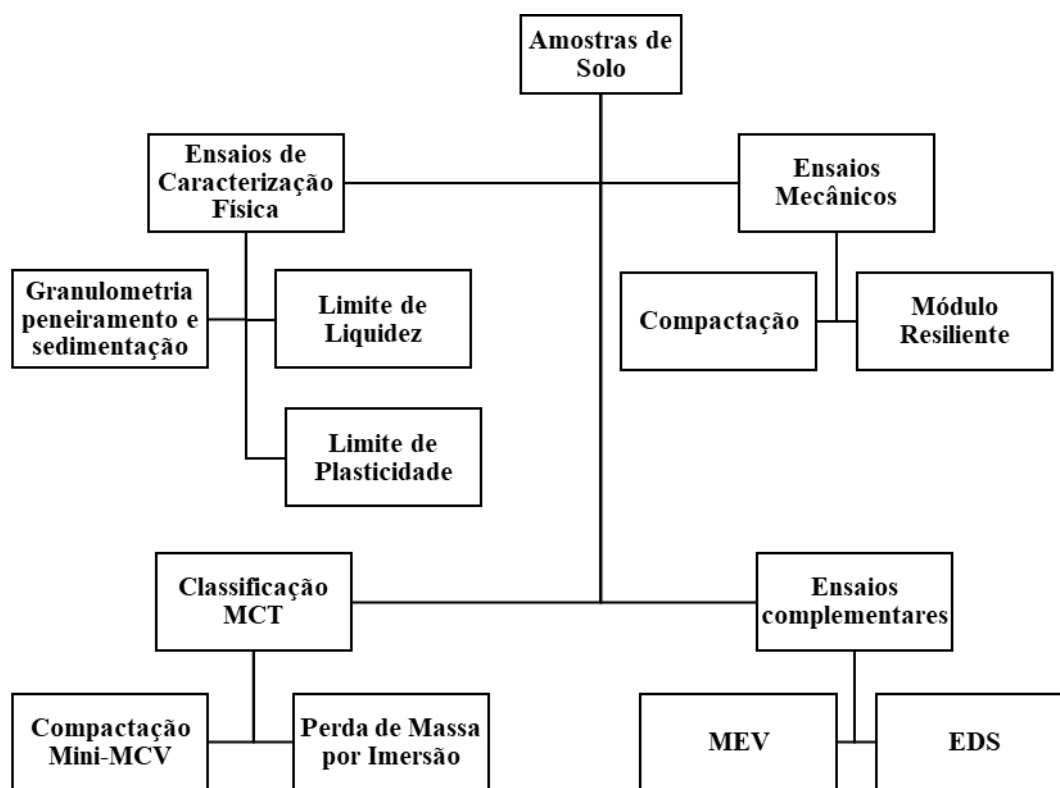
Ensaio Realizados

O fluxograma da Figura 03 aponta os ensaios realizados em todas as amostras deste estudo, que compreende, basicamente, os ensaios geotécnicos convencionais de granulometria por peneiramento e sedimentação (com uso de defloculante a base de hexametáfosfato de sódio) e limites de consistência (Limite de Liquidez – LL e Limite de Plasticidade – LP), assim como, os ensaios de compactação Mini-MCV e de Perda de Massa por Imersão para realização da Classificação MCT. Realizaram-se os ensaios mecânicos de compactação e de Módulo Resiliente (MR). Complementarmente, também caracterizou-se a microestrutura dos solos através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Foram coletados cerca de 160 kg de cada material (4 sacos de 40 kg) e a preparação geral das amostras para execução dos ensaios foi realizada conforme os procedimentos padrão já consagrado e indicados nas instruções dos métodos de ensaios (ME) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que se resume em: secagem ao ar livre ou em estufa (máximo 60 °C), destorroamento com auxílio de almofariz e mão de gral, medição da umidade

higroscópica, peneiramento e separação das quantidades de materiais necessárias (normatizadas) para cada tipo de ensaio a ser realizado.

Figura 03 - Fluxograma dos ensaios realizados. Fonte: Sousa (2016)



Os ensaios de compactação foram executados na energia de Proctor normal e, através destes, obteve-se as informações de Massa Específica Aparente Seca (MEAS, g/cm³) e umidade ótima (Wot). Os ensaios de MR foram realizados utilizando o equipamento triaxial de cargas repetidas do IME (Figura 04), na umidade ótima e na energia intermediária, seguindo o procedimento indicado em Medina e Motta (2005) e tendo como referência as seguintes normas: DNIT-ME 134/2010, ASTM D 3999-91 (2003) e BS EN 13286-7:2004. O ensaio de compactação mini-MCV (da metodologia classificação MCT) foi executado conforme procedimento padrão indicado em norma. A Tabela 02 apresenta as normas técnicas do DNIT consideradas para a realização dos ensaios.

Figura 04 - a), b) e c) Equipamento Triaxial de Cargas Repetidas do IME.**Tabela 02:** Normas utilizadas para orientação na execução dos ensaios

Ensaio	Norma
Compactação	DNIT-ME 164/2013
Granulometria	DNER-ME 051/94
Limite de liquidez - LL	DNER-ME 122/94
Limite de Plasticidade - LP	DNER-ME 082/94
Compactação Mini-MCV	DNER-ME 258-94
Perda de massa por imersão	DNER-ME 256-94
Módulo Resiliente – Ensaio Triaxial	DNIT-ME 134/2010 ASTM D 3999-91 (2003) BS EN 13286-7:2004

Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de raios X por Dispersão em energia (EDS) para fins de caracterização da microestrutura dos solos analisados foram realizados através do equipamento do IME apresentado na Figura 05, as amostras consideradas para estes ensaios estavam em estado natural e é representativa da fração fina dos solos estudados.

Figura 05 - (a) Visão geral do equipamento de MEV utilizado no IME e (b) detalhamento do posicionamento das amostras.

Resultados e Discussões

Na Tabela 03 são apresentadas características geotécnicas dos solos obtidas através dos ensaios compactação, granulometria e limites de consistência. Observa-se que boa parte das amostras apresentaram significativo teor de argila, porém há predominância da fração areia, ou seja, os materiais são solos arenosos finos, com variados teores de argila, apresentando índice de plasticidade acima de 16%.

O perfil de ocorrência do solo das amostras 51A e 51B, apresentado na Figura 02, permite observar que se trata de um solo residual que ainda preserva grande parte da estrutura da rocha-mãe, principalmente os veios horizontais que cruzam o talude de fora a fora. Ou seja, o processo de laterização pode não ter sido suficientemente intenso para a formação de óxihidróxidos de Ferro (Fe) e Alumínio (Al), presentes na fração argila. Tal característica pode ser confirmada com a análise granulométrica, mostrada na Tabela 03, na qual se verifica a significativa presença de silte - 21% na parte superior (A) e 7% na parte inferior (B) e, baixos teores de argila quando comparado as demais amostras.

Ainda observando os dados da Tabela 03, ao verificar os valores de LL e IP obtidos pode-se concluir que nenhum dos solos poderiam ser utilizados como camada de base, de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (BRASIL, 2006), uma vez que os resultados são todos maiores que 25% de LL e 6% de IP.

Realizou-se a classificação dos solos segundo os métodos tradicionais (TRB e SUCS) e também de acordo com a metodologia MCT, a Tabela 04 apresenta os resultados obtidos. Nota-se que somente duas amostras (51A e 52) encaixaram-se nas classes de bom comportamento como subleito segundo a classificação TRB, ou seja, oito dos solos (a maioria) seriam descartados para em camadas de pavimento.

Tabela 03 - Características Geotécnicas dos Solos Coletados.

Amostras	MEAS (g/cm ³)	Wot (%)	%Argila (<0,005mm)	%Silte (0,005 mm – 0,05 mm)	%Areia			%Pedregulho (>4,8 mm)	Limites de Consistência (%)		
					Fina (0,05 mm – 0,42 mm)	Média (0,42 mm – 2 mm)	Grossa (2 mm – 4,8 mm)		LL	LP	IP
41	1,781	15,2	40	10	24	23	3	0	38	15	23
42	1,816	13,2	33	9	33	24	1	0	30	13	17

44	1,882	12, 3	28	8	27	26	4	7	28	11	17
46	1,730	15, 0	37	13	26	18	4	2	37	15	22
48	1,992	10, 8	14	9	36	35	4	2	NP		
50	1,667	18, 0	36	23	27	10	2	2	29	11	18
51A	1,744	15, 4	7	21	71	1	0	0	NP		
51B	1,727	16, 5	4	7	76	13	0	0	NP		
52	1,995	9,5	17	11	44	24	3	1	19	9	10
53	1,760	16, 0	22	17	37	21	1	2	27	10	17

Sendo: IP – índice de plasticidade.

Tratando-se especificamente da Classificação MCT, 6 (seis) dos solos analisados apresentaram comportamento laterítico (LG' – solo argiloso laterítico e LA – Areia Laterítica) e são considerados excelentes para uso na pavimentação. Quatro solos tiveram classificação como de comportamento não laterítico, sendo NA (Areia Não Laterítica), NA' (solo Arenoso Não Laterítico) e NG' (solo Argiloso Não Laterítico).

No entanto, é válido ressaltar que segundo as experiências brasileiras as classes NA e NA', apesar de não lateríticas também podem apresentar bom desempenho, principalmente no que se refere ao comportamento mecânico, apresentando valores de MR e CBR na faixa de 300 MPa e 42,4%, respectivamente, indicando uma promissora utilização desse solo em camadas de sub-base ou base de pavimentos de baixo volume de tráfego, conforme estudo de MEDRADO (2009).

Assim, embora MEDRADO (2009) refira-se à pavimentos rodoviários, sugere-se a execução de trechos experimentais a fim de avaliar o uso desses solos (NA e NA') no pavimento ferroviário, mesmo que em camadas menos nobres.

Tabela 04: Classificação geotécnica tradicional e MCT.

Amostra	Classificação Tradicional					Classificação MCT
	TRB	Descrição TRB	Comportamento como Subleito	SUCS	Descrição SUCS	
41	A-6	Solo argiloso	Mau	CL	Argila inorgânica	LG'
42	A-6	Solo argiloso	Mau	SC	Areia Argilosa	LG'
44	A-6	Solo argiloso	Mau	SC	Areia Argilosa	NA'
46	A-6	Solo argiloso	Mau	CL	Argila inorgânicas	LG'
48	A-6	Solo argiloso	Mau	SC	Areia	LA

					Argilosa	
50	A-6	Solo argiloso	Mau	CL	Argila inorgânicas	LG'
51A	A-2-4	Pedregulho/Areia Siltosa/Areia Argilosa	Bom	SM	Areia Siltosa	NA'
51B	A-4	Solo siltoso	Sofrível	SM	Areia Siltosa	NA
52	A-2-4	Pedregulho/Areia Siltosa/Areia Argilosa	Bom	SC	Areia Argilosa	LA
53	A-6	Solo argiloso	Mau	SC	Areia Argilosa	NG'

A classificação de solo não laterítico para a amostra 51A convergiu para a observação feita em campo quando da identificação de um solo jovem. A amostra 51B apesar de não ser laterítica, segundo a classificação TRB é um solo considerado bom para uso como subleito.

A amostra 52 encaixou-se dentro de ambos os critérios uma vez que se classificou dentro da classe LA da metodologia MCT e como um solo bom para pavimentação, segundo a TRB. Apenas a amostra 53 apresentou classificação de solo argiloso não laterítico (NG'), portanto, não é recomendada para uso na pavimentação (Villibor e Nogami, 2009).

É importante destacar que, conforme Guimarães (2019), solos lateríticos arenosos apresentam deformação permanente muito baixa, enquanto os argilosos (LG', na classificação MCT) se subdividem em dois grupos, um de baixa e outro de alta deformação permanente (para tensões na ordem de 420 kPa de tensão desvio e 150 kPa para tensão confinante). Todavia, com a relação ao comportamento resiliente, Lima et al. (2020) mostrou que o MR destes solos é, geralmente, bem mais elevado, do que os obtidos em solos não lateríticos.

Quanto aos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de raios X por Dispersão em energia (EDS), apresentam-se as Figuras 06 a 15, as quais apresentam as imagens do MEV, com aproximação de 3.000 vezes, e o respectivo gráfico gerado pelo EDS como indicativo dos elementos químicos que compõem cada amostra. As legendas das figuras indicam a classificações TRB e MCT obtidas para o referido material.

Como forma de embasamento para as discussões a seguir efetuadas, é importante ter em mente que as amostras são naturais, e não compactadas. As Figuras 06 e 07 apresentar detalhes das amostras 41 e 42 as quais embora não apresentem a mesma porosidade, possuem vazios comuns a solos lateríticos segundo Nogami e Villibor (1995).

A Figura 08, expõe a microestrutura da amostra 44 tratando-se de um solo com contornos bem distinguíveis (destacado na figura pelo círculo), o que pode indicar um solo saprolítico, tal inferência é correspondente à classificação MCT na qual resultou em um solo de comportamento não laterítico, com microestrutura semelhante ao solo saprolítico de pegmatito com caolinita e haloisita descrito em Nogami e Villibor (1995).

Figura 06 - Imagem MEV da amostra 41 (A-6/LG'), aprox. 3.000x e gráfico EDS.

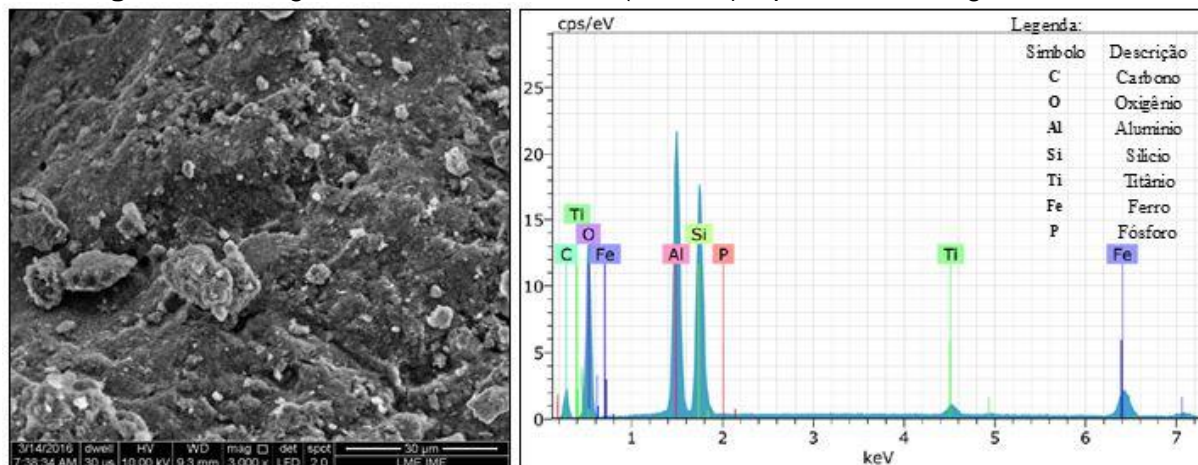


Figura 07 - Imagem MEV da amostra 42 (A-6/LG'), aprox. 3.000x e gráfico EDS.

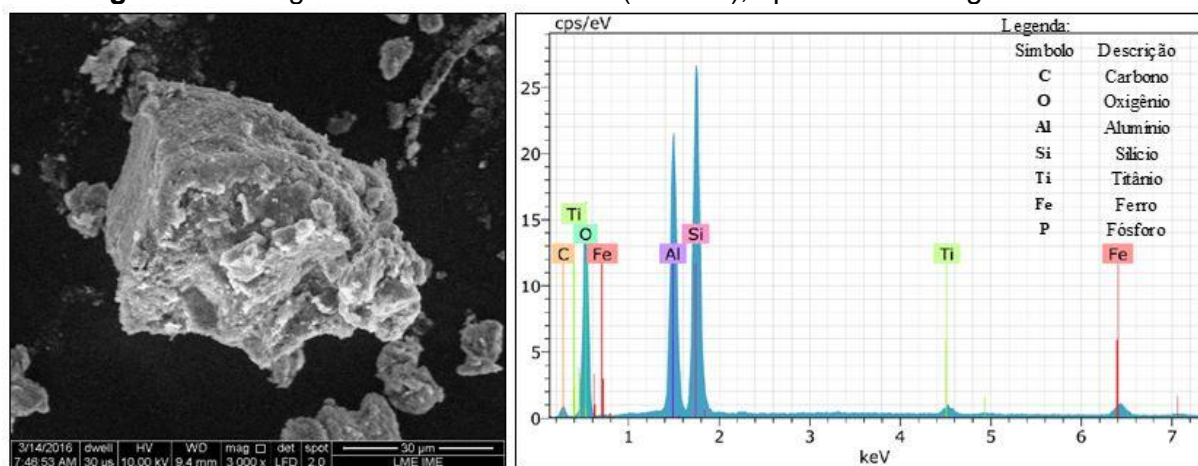
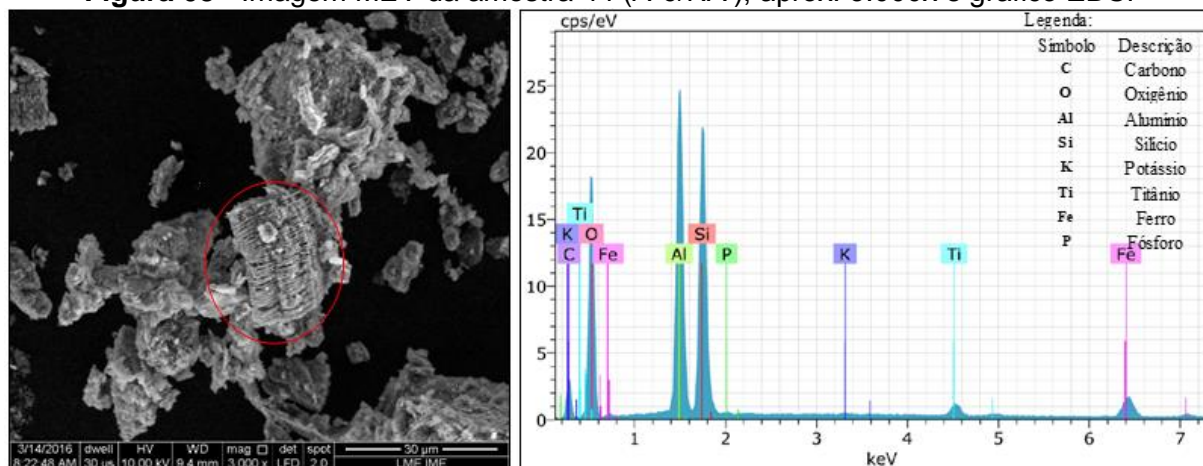


Figura 08 - Imagem MEV da amostra 44 (A-6/NA'), aprox. 3.000x e gráfico EDS.

As Figuras 09 e 10 referentes às amostras 46 e 48, respectivamente, mostram algumas partículas unidas, porém não foi possível identificar vazios aparentes. Todavia, a classificação MCT destes solos indicou comportamento laterítico, sendo LG' e LA. Por outro lado, a Figura 11 que apresenta detalhe da amostra 50, mostra a presença de vários vazios e classificação MCT LG', semelhante às características da Amostra 41.

As Figuras 12 e 13 (Amostras 51A e 51B) apresentam superfícies rugosas, não sendo possível inferir os tipos de solo, no entanto, a classificação MCT destes indicaram solos de comportamento NÃO laterítico (NA' e NA, respectivamente). Por último as Figuras 14 e 15 (Amostras 52 e 53) apresenta superfície rugosas e indícios de vazios, porém também não é possível inferir os tipos de solo.

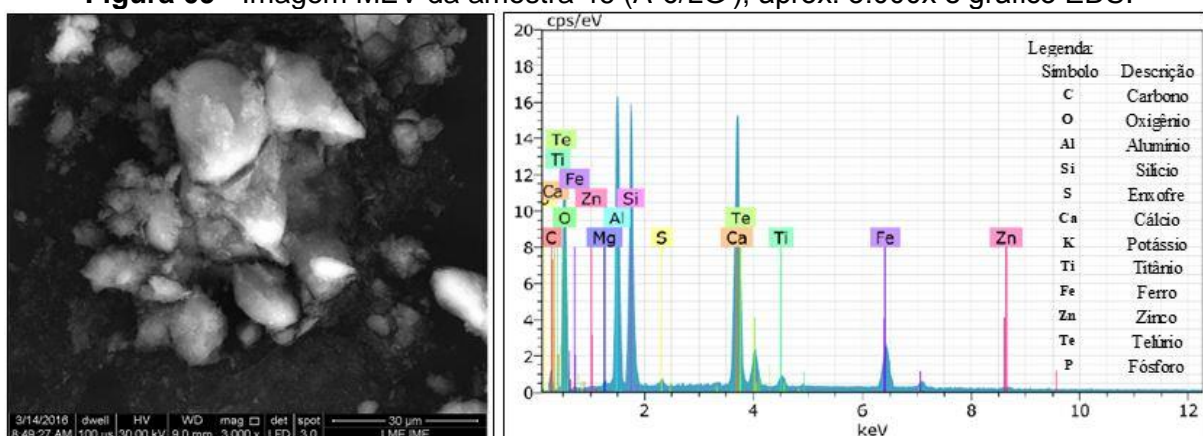
Figura 09 - Imagem MEV da amostra 46 (A-6/LG'), aprox. 3.000x e gráfico EDS.

Figura 10 - Imagem MEV da amostra 48 (A-6/LA'), aprox. 3.000x e gráfico EDS.

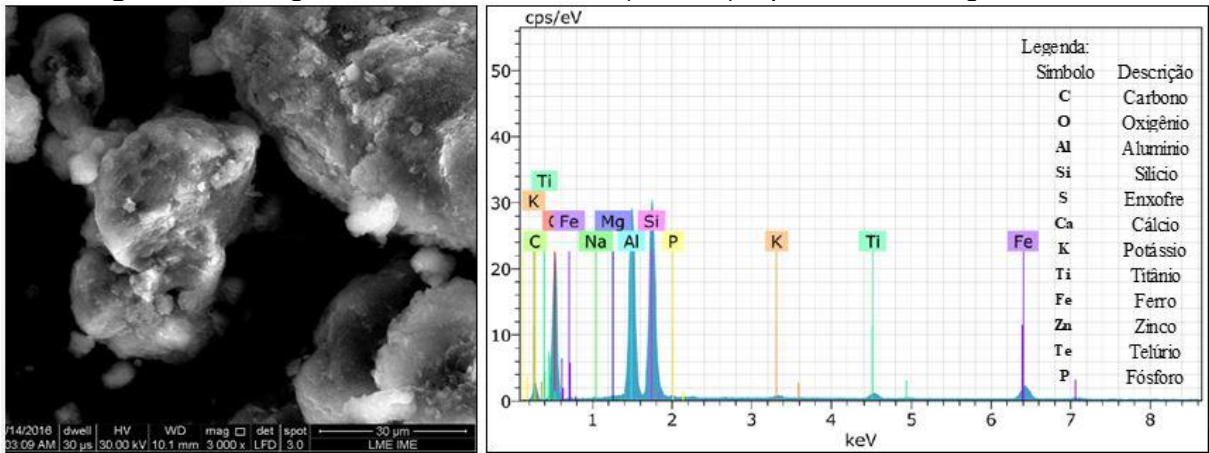


Figura 11 - Imagem MEV da amostra 50 (A-6/LG'), aprox. 3.000x e gráfico EDS.

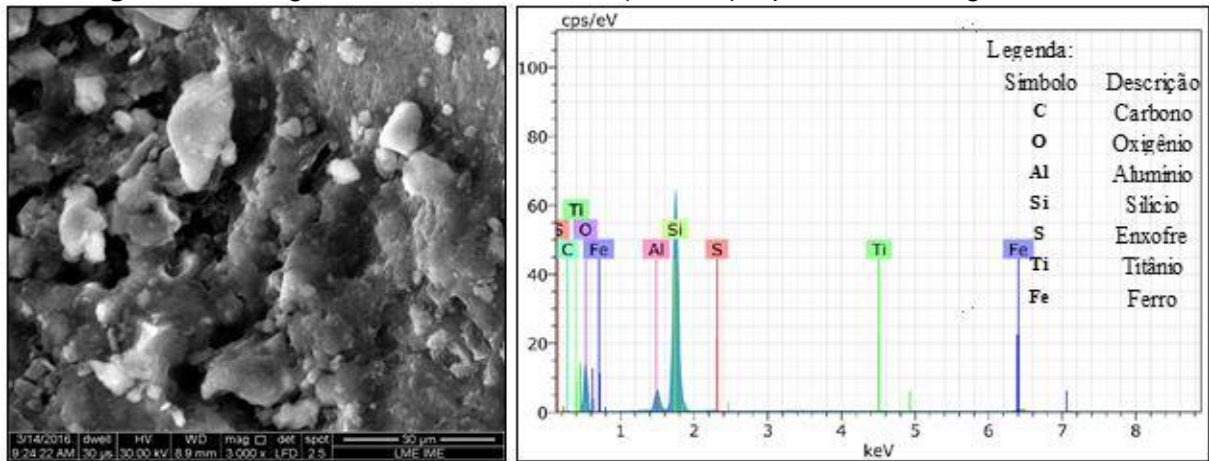


Figura 12 - Imagem MEV da amostra 51A (A-2-4/NA'), aprox. 3.000x e gráfico EDS.

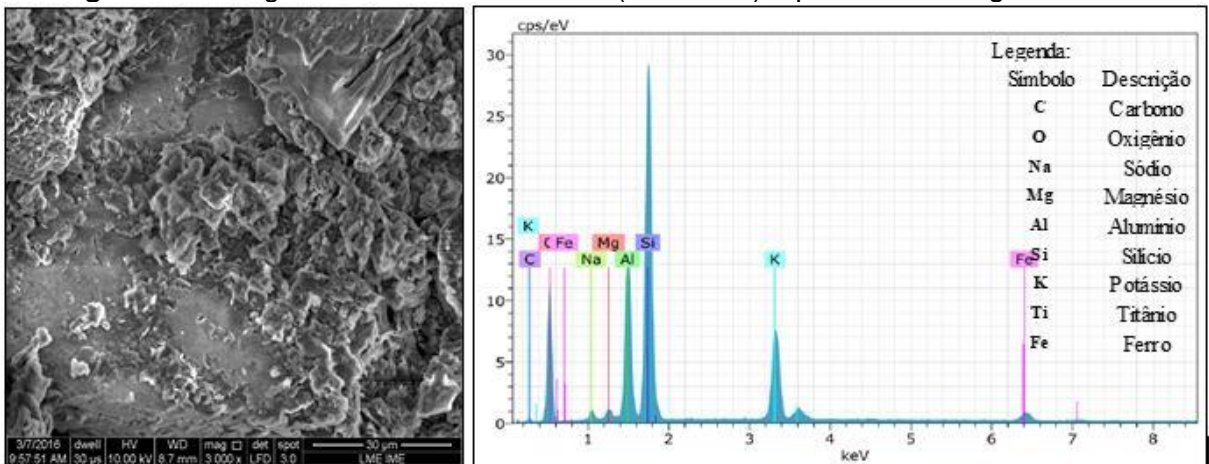


Figura 13 - Imagem MEV da amostra 51B (A-4/NA), aprox. 3.000x e gráfico EDS.

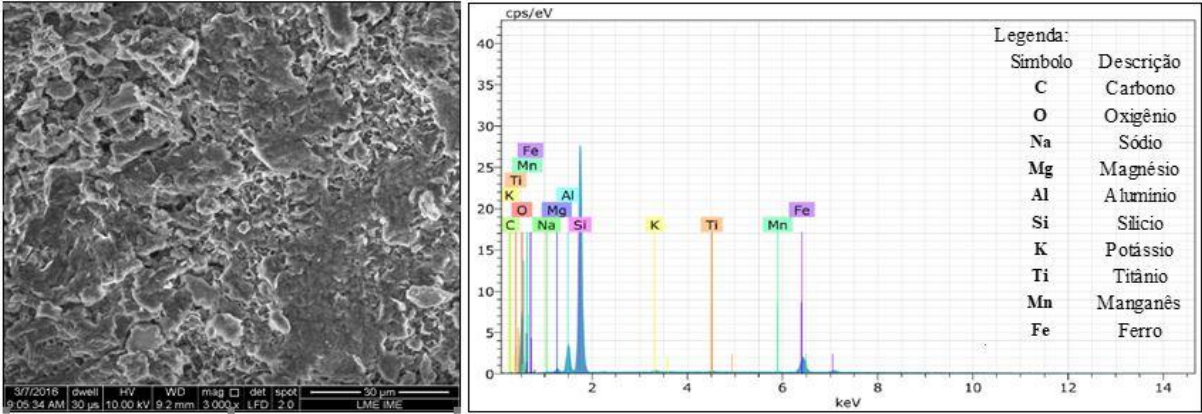


Figura 14 - Imagem MEV da amostra 52 (A-2-4/LA'), aprox. 3.000x e gráfico EDS.

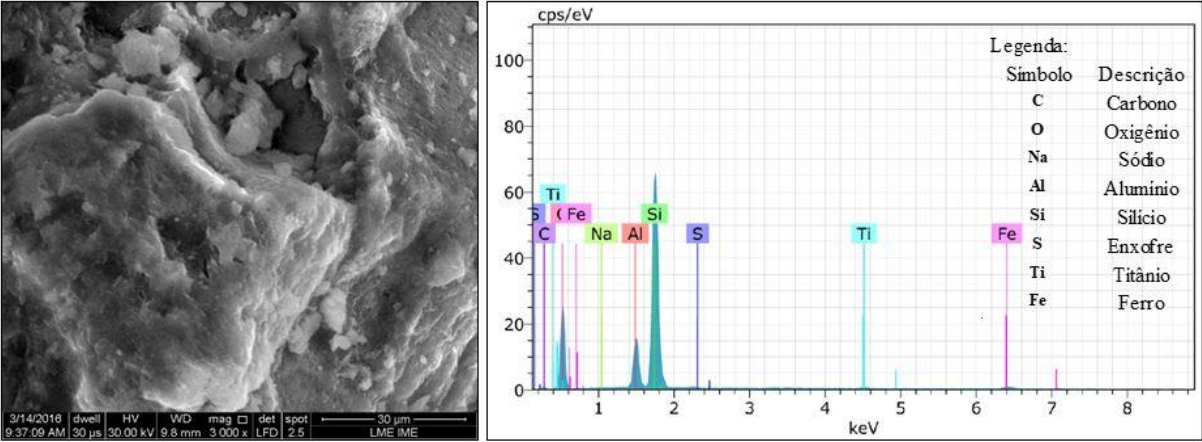
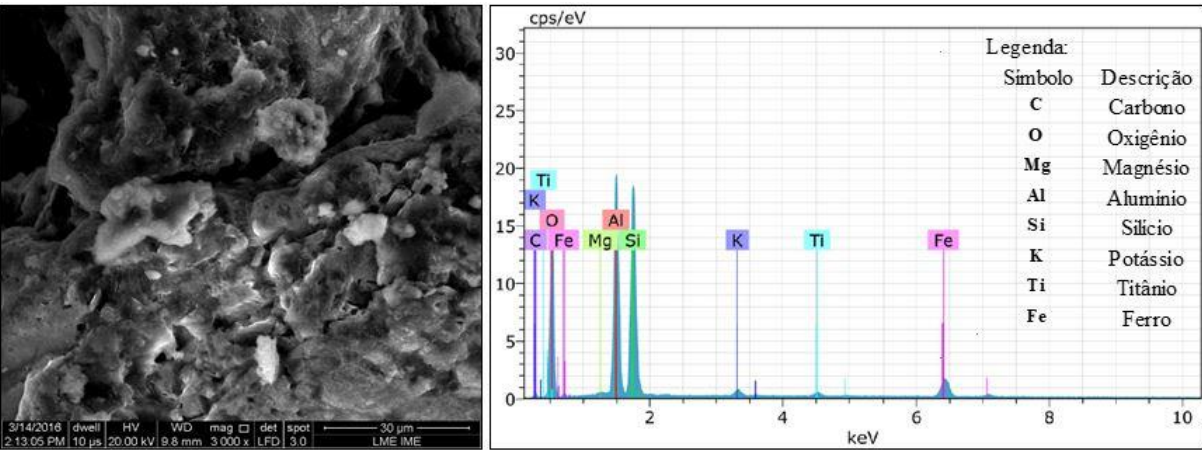


Figura 15 - Imagem MEV da amostra 53 (A-6/NG'), aprox. 3.000x e gráfico EDS.



Na Tabela 05, apresentada posterior às Figuras supracitadas, indica o percentual de cada elemento químico constituinte das amostras, obtidos através do EDS, indicando-se quais são os predominantes.

Com os resultados de EDS, pode-se inferir que as amostras têm, em geral, como principais elementos o Carbono (C), o Oxigênio (O), o Alumínio (Al) e o Silício (Si). Somente as amostras 46 e 51A apresentaram outros elementos de relevada predominância, como o Cálcio (Ca) e Potássio (K), respectivamente. Pode-se observar que a amostra 51B apresentou a maior porcentagem de Ferro, porém baixo teor de Alumínio, quando se compara com as demais amostras.

Tabela 05 - Elementos constituintes – EDS.

Amos- tra	Elementos (%)													
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	K	Ti	Mn	Fe	Zn	Te
41	19,2	43,3			15,8	14,2				1,3		6,1		
42	9,0	48,1			16,0	23,3				0,9		2,8		
44	19,8	47,0			14,4	14,2			0,1	1,1		3,5		
46	6,3	40,3			11,0	11,2	0,2	16,4		0,5		6,5	0,5	7,0
48	16,8	46,9	0,1	0,0	14,5	17,0			0,2	0,6		3,8		
50	4,6	42,0			3,8	47,6	0,0			0,2		1,7		
51A	3,3	44,3		0,7	11,3	27,8			10,3			2,3		
51B	5,1	39,8	0,2	0,7	3,8	38,9			0,5	0,3	0,3	10,6		
52	6,2	49,0	0,1		7,2	36,1	0,0			0,1		1,3		
53	5,4	49,3		0,2	18,2	20,4			0,2	0,3		6,0		

Em relação aos elementos predominantes encontrados, infere-se também que, através de combinações, os solos analisados podem constitui-se diversos íons como: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , típicos dos processos de formação de solos tropicais (regiões com altas temperatura e pluviosidade), como é o caso da região de estudo.

Na sequência, serão apresentados os valores de módulo resiliente médio ($\text{MR}_{\text{médio}}$) dos materiais (Tabela 06), bem como os valores dos coeficientes de regressão linear k_1 , k_2 e os coeficientes de correlação (R^2) dos modelos de comportamento em função da Tensão Desvio - σ_d (Areno-argiloso) e da Tensão Confinante - σ_3 (Arenoso-granular).

Tabela 06 - Características Resilientes dos Solos Analisados – Modelos Bidimensionais.

Amostra	Umidade	$\text{MR}_{\text{médio}}$ (MPa)	Modelo Areno-Argiloso $\text{MR} = k_1(\sigma_d)^{k_2}$ (MPa)			Modelo Arenoso-Granular $\text{MR} = k_1(\sigma_3)^{k_2}$ (MPa)		
			k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	R^2
41	Wot	483	264	-0,25	0,790	239	-0,23	0,448
42	Wot	462	227	-0,29	0,683	201	-0,27	0,395
44	Wot	407	261	-0,18	0,665	275	-0,13	0,211
46	Wot	542	302	-0,20	0,423	313	-0,24	0,827
48	Wot	375	288	-0,10	0,114	393	-0,03	0,005
50	Wot	275	67	-0,56	0,930	634	-0,47	0,470
51A	Wot	164	105	-0,17	0,252	153	-0,009	0,001
51B	Wot	230	131	-0,23	0,495	153	-0,12	0,101
52	Wot	414	235	-0,23	0,552	243	-0,17	0,202
53	Wot	304	138	-0,30	0,321	140	-0,23	0,125

Observa-se que as amostras 41, 42, 44, 46, 48 e 52 apresentaram MR médio acima de 375 MPa, o que pode ser considerado um valor muito elevado para solos arenosos finos, muito embora a análise pelo valor médio pode levar a uma interpretação equivocada dos resultados dos ensaios, uma vez que se leva em consideração todos os valores obtidos no ensaio inclusive aqueles que podem ser considerados “aberrantes” em um estudo estatístico.

Os valores mais baixos das amostras 51A e 51B não são, necessariamente, indicativos de desempenho ruim deste material como camada de pavimento. Para estes materiais, o valor muito próximo de zero para R^2 indica não um enquadramento ruim, mas uma tendência para módulo resiliente constante. Com relação à utilização futura deste material, recomenda-se em camadas de reforço do subleito, ou camada final de terraplenagem.

Quando se analisa o coeficiente de correlação (R^2) dos modelos, apresentados na Tabela 06, verifica-se que na maioria dos casos o enquadramento foi ruim, o que indica que os solos não apresentaram tendência de serem influenciados mais pela tensão desvio ou confinante, conforme modelos considerados, exceto nos casos das amostras:

46 - Indicou ter comportamento resiliente mais influenciado pela tensão confinante, o que é esperado para solos arenosos. A análise visual, além do ensaio de granulometria, confirma a característica arenosa deste solo;

50 – Indicou ser mais influenciada pela tensão desvio, sendo um resultado típico de solos finos e coesivos. Tal resultado é correspondente com as classificações geotécnicas utilizadas, pois indicou ser um solo argiloso.

Na tentativa de obter um modelo de comportamento mais adequado (com melhores coeficientes de correlação), testou-se os solos para o modelo composto que considera tanto a tensão confinante quanto a tensão desvio. Realizando a análise de regressão não linear através software Statistica foi possível obter os valores de k_1 , k_2 , k_3 e R^2 apresentados na Tabela 07, verifica-se que todos os solos apresentaram enquadramento melhor ao modelo composto quando comparado aos modelos anteriores.

Tabela 07 - Características Resilientes dos Solos Analisados – Modelo Composto.

Amostra	Umidade	Modelo Composto $MR = k_1(\sigma_3)^{k_2}(\sigma_d)^{k_3}$ (MPa)			
		k_1	k_2	k_3	R^2
41	Wot	291,993	0,048	-0,275	0,883
42	Wot	190,259	0,036	-0,414	0,890
44	Wot	317,359	0,145	-0,288	0,878

46	Wot	315,940	0,053	-0,309	0,902
48	Wot	388,865	0,325	-0,387	0,678
50	Wot	89,162	0,121	-0,601	0,946
51A	Wot	165,954	0,450	-0,548	0,847
51B	Wot	176,407	0,297	-0,478	0,848
52	Wot	233,253	0,153	-0,429	0,841
53	Wot	88,675	0,211	-0,747	0,747

Nas Figuras de 16 a 25 são apresentados os resultados dos ensaios de módulo resiliente de forma gráfica. Observa-se que os resultados indicam um comportamento descendente, ou seja, quanto maior as tensões menores os valores de MR obtidos e que alguns solos se mostraram mais sensíveis à variação das tensões como é claramente verificado nas amostras 50 e 53 (ambos solos de comportamento argiloso nas classificações MCT e TRB).

Figura 16 - Amostra 41 - à esquerda Modelos Arenos-Argiloso e Arenoso-Granular e, à direita Modelo composto.

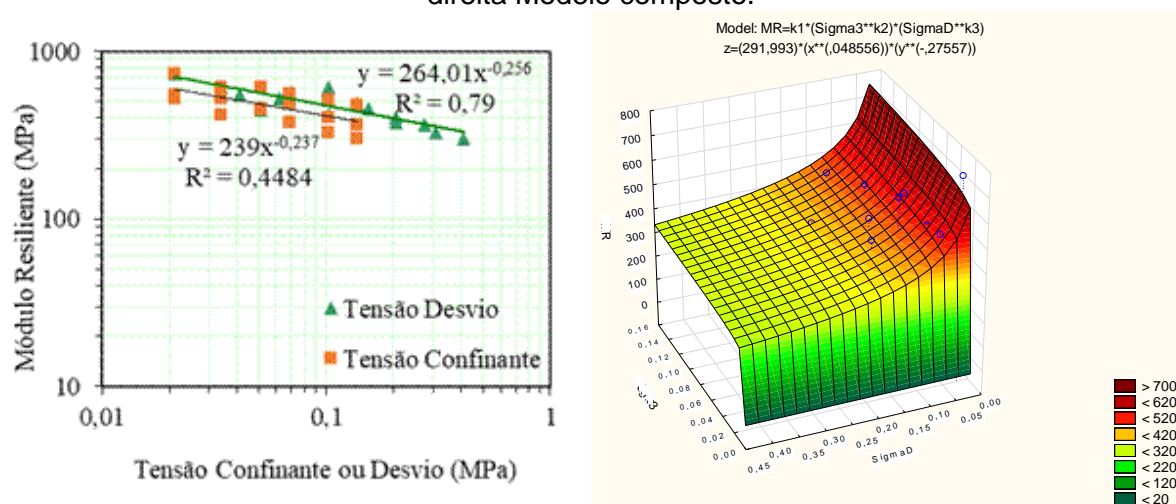


Figura 17 - Amostra 42 - à esquerda Modelos Arenos-Argiloso e Arenoso-Granular e, à direita Modelo composto.

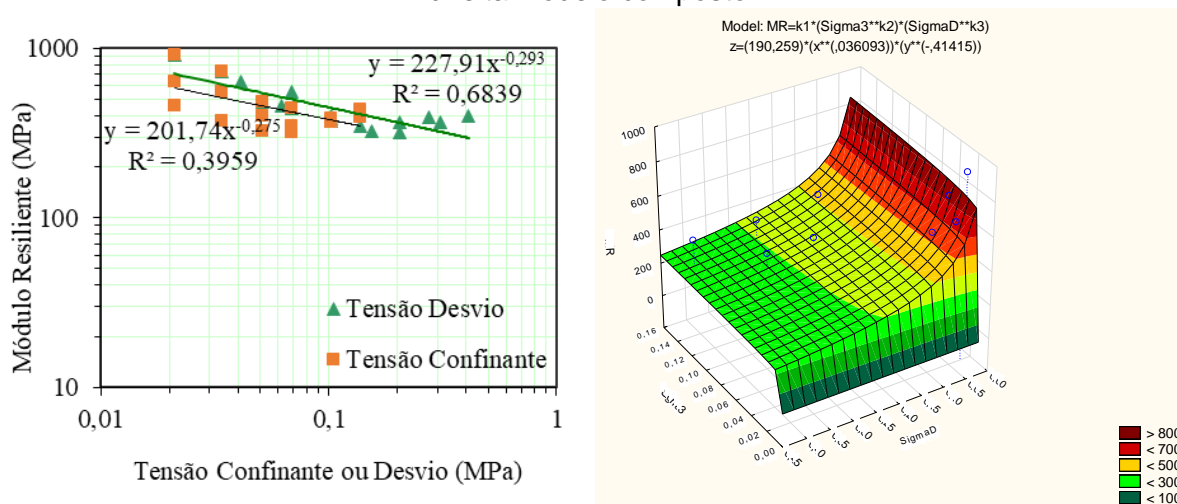


Figura 18 - Amostra 44 - à esquerda Modelos Arenos-Argiloso e Arenoso-Granular e, à direita Modelo composto.

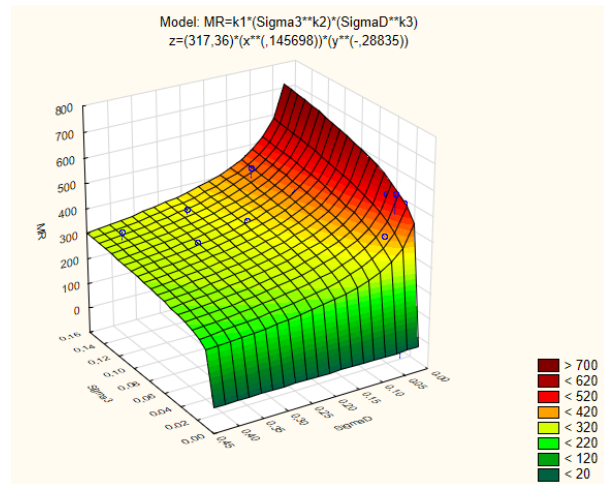
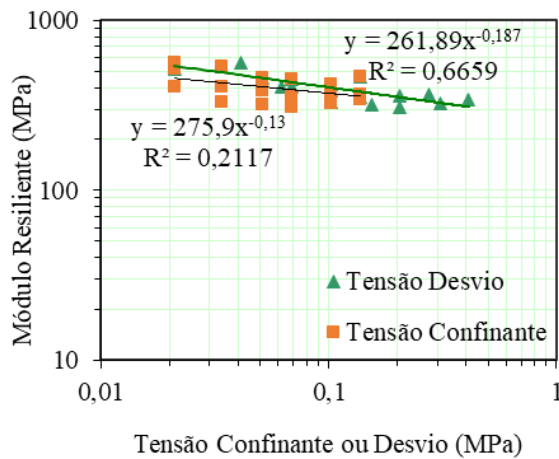


Figura 19 - Amostra 46 - à esquerda Modelos Arenos-Argiloso e Arenoso-Granular e, à direita Modelo composto.

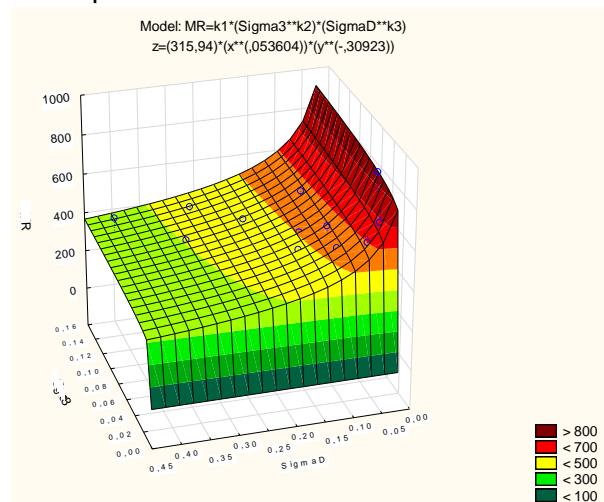
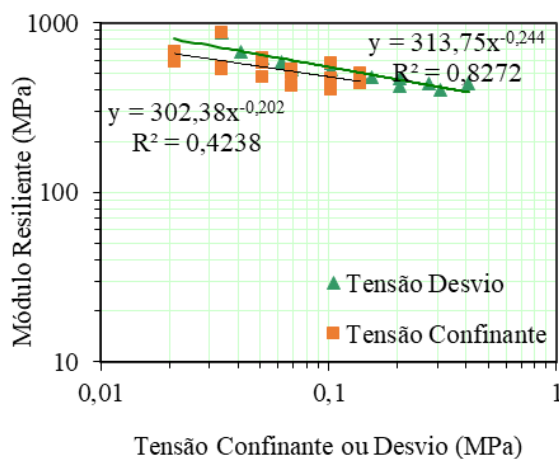


Figura 20 - Amostra 48 - à esquerda Modelos Arenos-Argiloso e Arenoso-Granular e, à direita Modelo composto.

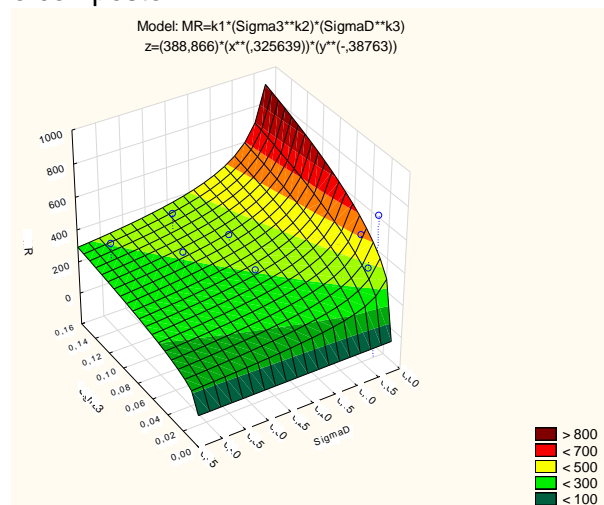
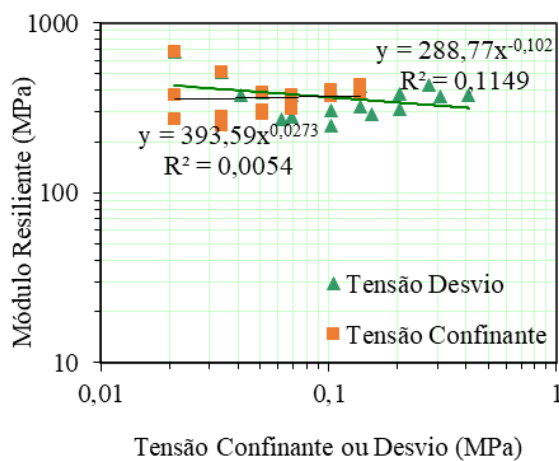


Figura 21 - Amostra 50 - à esquerda Modelos Arenos-Argiloso e Arenoso-Granular e, à direita Modelo composto.

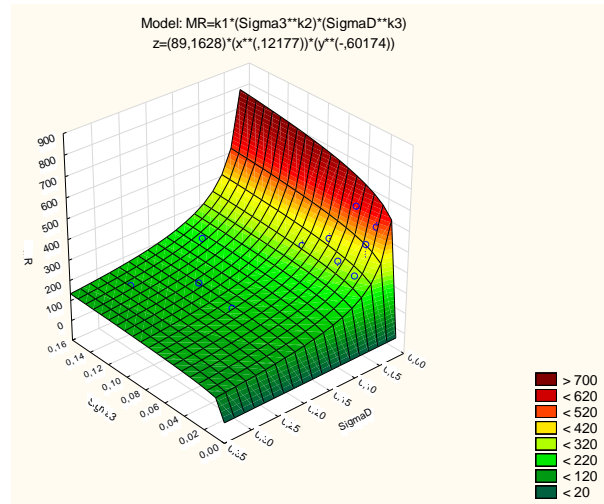
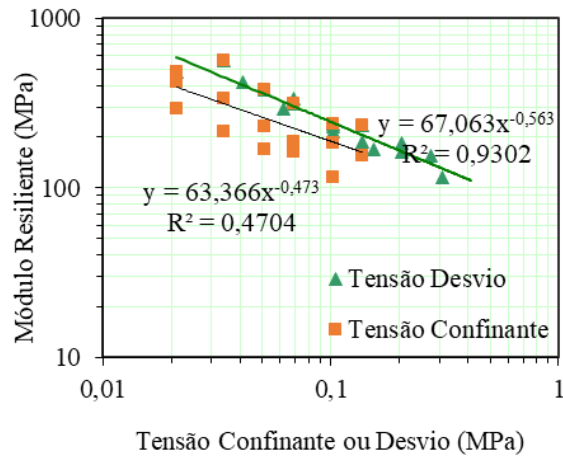


Figura 22 - Amostra 51A - à esquerda Modelos Arenoso-Argiloso e Arenoso-Granular e, à direita Modelo composto.

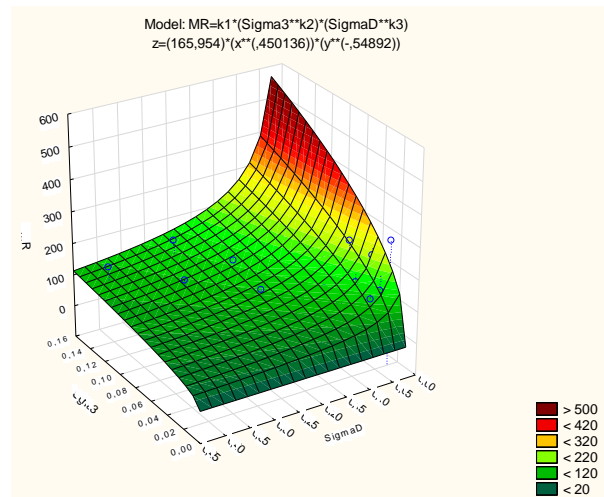
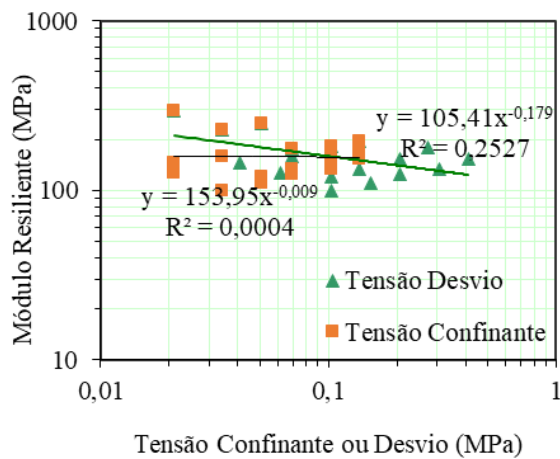


Figura 23 - Amostra 51B - à esquerda Modelos Arenoso-Argiloso e Arenoso-Granular e, à direita Modelo composto.

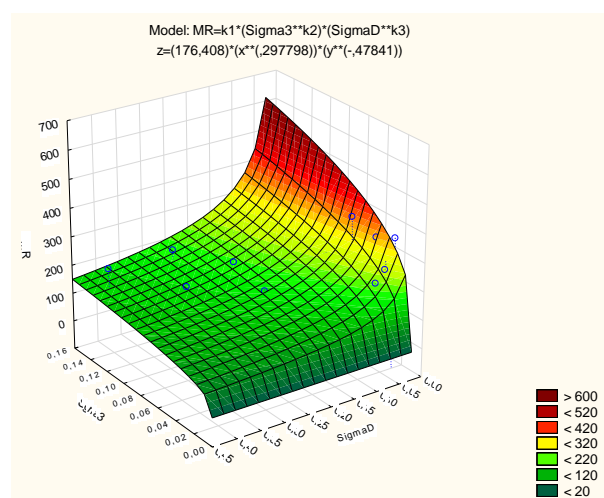
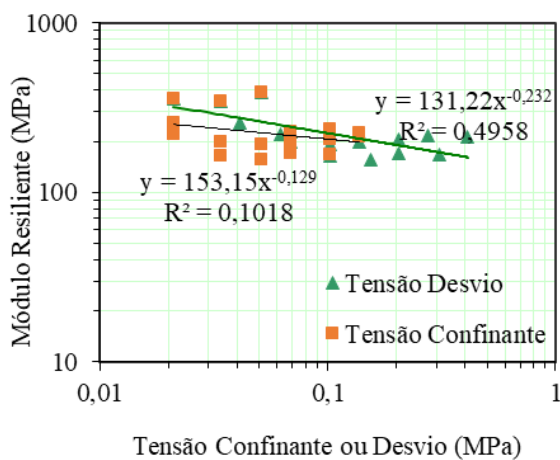


Figura 24 - Amostra 52 - à esquerda Modelos Arenoso-Argiloso e Arenoso-Granular e, à direita Modelo composto.

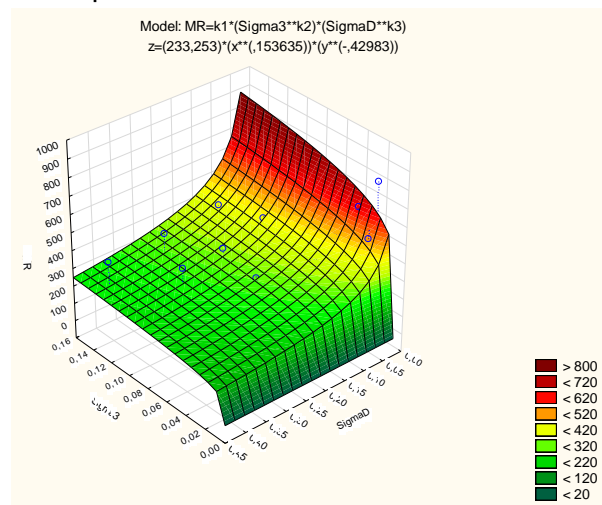
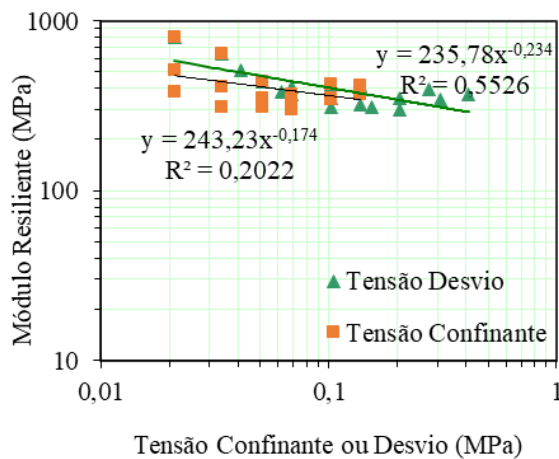
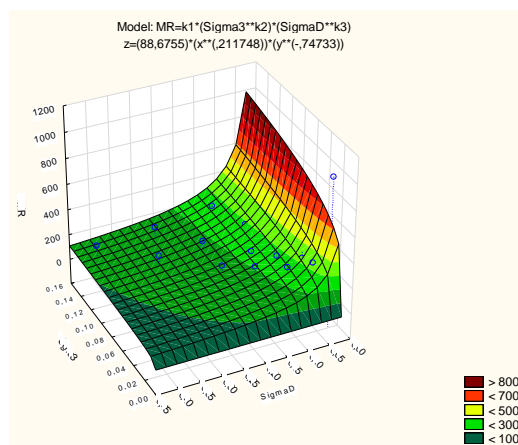
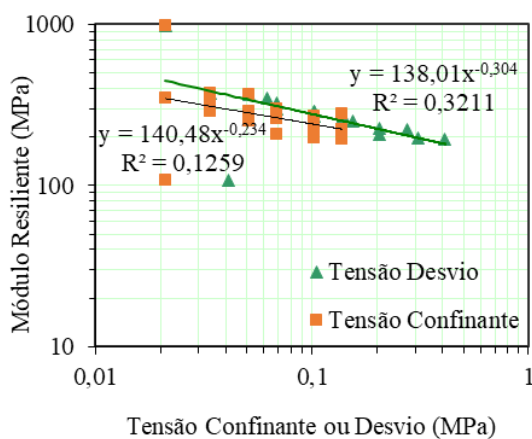


Figura 25 - Amostra 53 - à esquerda Modelos Arenoso-Argiloso e Arenoso-Granular e, à direita Modelo composto.



Considerações Finais

Neste trabalho foram apresentados os perfis de ocorrência de solos tropicais de textura fina identificados ao longo dos taludes de corte da Estrada de Ferro de Carajás (EFC), situada na região norte do país.

Apesar das características geotécnicas distintas, na maior parte dos casos, os solos apresentaram elevado valor de módulo resiliente, alguns assemelhando-se inclusive aos valores típicos de materiais pedregulhosos.

Por outro lado, as classificações tradicionais TRB e SUCS, que conforme mencionado não são perfeitamente adequadas as condições reais de campo dos solos brasileiros, indicaram que os solos estudados são ruins para uso como subleito de pavimentos, porém de acordo com a classificação MCT, 6 dos solos

estudados apresentaram comportamentos lateríticos, o que se considera válido já que foi desenvolvida especialmente para solos tropicais.

Alguns solos apresentaram comportamento não laterítico, os quais não são indicados para pavimentação segundo a metodologia considerada, todavia, já existem estudos que afirmam que os solos dos tipos NA e NA' podem apresentar bom desempenho em pavimentos rodoviários, sendo necessários cuidados especiais na execução, por isso, sugere-se a execução de segmentos experimentais a fim de comprovar o bom desempenho destes tipos de solo como materiais de pavimentação, principalmente no caso de ferrovias que não contam com a impermeabilização das camadas menos nobres, como acontece em rodovias.

Conforme foi apresentado, as áreas que foram analisadas como passíveis de exploração, segundo os pontos de coleta das amostras, resultaram em 161.305 m². Neste contexto, considerando uma média de 1 metro de profundidade disponível para uso e apenas os solos recomendados para utilização (LA, LG', NA e NA', total de 9 tipos de solo), seria possível utilizar um grande volume de material (113.090 m³) nas obras de pavimentação local, inclusive da própria ferrovia, reduzindo assim os custos de transportes e consequentemente das obras.

Por tanto, os resultados obtidos indicaram tratar-se de uma região com amplas possibilidades de utilização destes solos finos, os quais mostraram-se viáveis para uso em camadas de pavimento. Sendo, no entanto, necessária a continuação das pesquisas destes solos no que tange a realização de ensaios de deformação permanente, de forma a possibilitar além do entendimento do comportamento destes solos quanto à deformação, também a posterior simulação do dimensionamento de estruturas de pavimentos, seguindo as premissas atuais da mecânica dos pavimentos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, C. B. C. de. & NETO, S. A. D. Caracterização de Solos Lateríticos para Utilização em Pavimentos de Baixo Custo na Cidade de Canindé/CE. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG. **Anais...** Artigo 187. Goiânia/GO, 2014.

ASTM D3999-91(2003), Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 1991, www.astm.org.

BRASIL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, publicação 719. **Manual de pavimentação**. 3ª ed. 274p. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, publicação 719. **Manual de pavimentação**. 3ª ed. 274p. Rio de Janeiro, 2006.

BSI — British Standards Institution. **BS EN 13286-7:2004**, Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. London, 2004, <https://www.en-standard.eu/>.

CHAVES, F. J. **Caracterização geotécnica de solos da Formação Barreiras da Região Metropolitana de Fortaleza para aplicação em obras rodoviárias**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2000.

COSTA, J. H. MOTTA, L. M. G. Caracterização Geotécnica dos solos finos, do litoral do Estado de Sergipe, visando aplicação em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego. **Revista Pavimentação**, p. 45- 57, ano II, 2007.

DALLA ROZA, A. E. MOTTA, L. M. G. Classificação MCT com relação ao comportamento resiliente e deformação permanente em solos do Mato Grosso. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG. **Anais...** Bahia, 2018.

DELGADO, B. G.; GUIMARÃES, A. C. R.; MOTTA, L. M. G. Análise de um Solo Tropical do Oeste do Maranhão como Material de Sublastro para a Estrada de Ferro de Carajás. **Revista Pavimentação**, v. 29, p. 43-57, 2013.

DELGADO, A. K. C. **Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do distrito federal para uso na pavimentação rodoviária**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília (UnB). Brasília, 2007.

FARIAS, W. M.; CARDOSO, F. B. da F.; MARTINS, E. de S.; CARVALHO, J. C. de A influência do oxi-hidróxido de Fe matricial no comportamento mecânico de solos tropicais. In: *XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, COBRAMSEG. **Anais...** Artigo 150. São Paulo/SP, 2002.

FUTAI, M.M.; LACERDA, W.A.; MARTINS, A.P.S. Influence of Physicochemical Interactions on the Mechanical Behavior of Tropical Residual Gneiss Soils. **Revista Soils and Rocks**, 38(1). p. 9-25. São Paulo/SP, 2015.

GUIMARÃES, A. C. R. MOTTA, L. M. G. CASTRO, C. D. (2019) Permanent deformation parameters of fine – grained tropical soils, **Road Materials and Pavement Design**, 20:7, 1664-1681, DOI: 10.1080/14680629.2018.1473283.

LIMA, C. de.; MOTTA, L da. ARAGÃO, F.; GUIMARÃES, A. Mechanical Characterization of Fine-Grained Lateritic Soils for Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design. **Journal of Testing and Evaluation**, ASTM International, West Conshohocken, PA (2020). DOI: 10.1520/JTE20180890.

MARANGON, M. **Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilizando Solos Lateríticos Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 2004.

MARSON, M. **Análise Crítica da Classificação MCT para Solos Tropicais**. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos/SP, 2004.

MEDINA, J. & MOTTA, L. M. G. da. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª Edição. ISBN 85-905987-1-3. Rio de Janeiro, 2006.

MEDRADO, W. A. **Caracterização Geotécnica de Solo da Região Norte de Minas Gerais para Aplicação em Obras Rodoviárias**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: Brazilian Simposium of Tropical Soils in Engineering. **Anais...** Rio de Janeiro – RJ, 30-41. 1981.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D. F. Use of lateritic fine-grained soils in road pavement base courses. **Geotechnical and Geological Engineering**. 167-182. 1991.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D. F. Ampliação do uso da metodologia MCT no estudo de solos tropicais para pavimentação. In: 28th Annual Meeting of Paving. **Anais...** Belo Horizonte – MG. 184-209. 1994.

NOGAMI, J. S & VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Editora Villibor. São Paulo, 1995.

SANTOS, E. F. dos. & PARREIRA, A. B. Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. In: *44ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv*. **Anais...** Foz do Iguaçu/PR, 2015

SANTOS, J. D. **Contribuição ao estudo dos solos lateríticos granulares como camada de pavimento**. Tese de Doutorado, Universidade federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ, 1998.

SILVA FILHO, J. C. & GUIMARÃES, A. C. R. Análise da Influência do Tipo de Veículo no Comportamento Estrutural de um Pavimento Ferroviário. In: *42ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv*. **Anais...** Gramado/RS, novembro de 2013.

SILVA, B. A. **Aplicação das metodologias MCT e Resiliente a solos finos do centro-norte do Mato Grosso**. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia - IME. Rio de Janeiro/RJ, 2003.

SILVA, S. F.; SILVA, T. O.; PITANGA, H. N.; DIAS, L. S. (2012) Estudo comparativo entre os sistemas tradicionais de classificações geotécnicas de solos e a classificação MCT. In: XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG. **Anais...** Artigo 35. Porto de galinhas/PE, 2012.

SILVEIRA, V. L.; MONTEIRO, S. R.; SANTANA, C. A.; GUIMARÃES, A. C. R. Estudo de um Solo Localizado ao Longo da Estrada de Ferro de Carajás para utilização em Pavimentação Ferroviária. In: *43ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv*. **Anais...** Maceió/AL, 2014.

SOUSA, M. A. S. **Análise geotécnica de solos tropicais de ocorrência ao longo da Estrada de Ferro Carajás para uso como camadas de pavimento rodoviário**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2016.

TAKEDA, M. de C.; PARREIRA, A. B.; FERNANDES, E. Identificação da Gênese de Solos Tropicais a Partir de Microscopia Eletrônica de Varredura, Difração de Raios-X e Azul de Metileno e Comparação dos Resultados com Indicações Fornecidas Pela Metodologia MCT. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG. **Anais...** Artigo 292. Curitiba/PR, 2006.

VERTAMATTI, E. **Contribuição ao Conhecimento Geotécnico de Solos da Amazônia com Base na Investigação de Aeroportos e Metodologias MCT e Resiliente**. Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA. São José dos Campos, 1988.

VILLIBOR, D. F. & NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso de solos finos lateríticos**. Editora Arte & Ciência, São Paulo, 2009.

VILLIBOR, D. F. ALVES, D. M. L. Classificação de Solos Tropicais de Granulação Fina e Grossa. **Revista Pavimentação**, v. 43, p. 16–37, 2017.

ZORZI, C. **Caracterização dos Solos Tropicais Lateríticos para Reforço de Pavimentos**. Monografia. Universidade São Francisco, Itatiba, 2008.

NOTAS DE AUTOR

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Mayssa Alves da Silva Sousa - concepção, coleta de dados, análise de dados, elaboração do manuscrito e revisão das diversas versões do trabalho.

Antonio Carlos Rodrigues Guimarães – concepção, coleta de dados, análise de dados, participação ativa da discussão dos resultados; revisão e aprovação da versão final do trabalho.

Carmen Dias Castro – análise de dados, tradução do resumo para o inglês e espanhol, reestruturação da introdução e, revisão e aprovação da versão final do trabalho.

FINANCIAMENTO

Vale S.A.

CONSENTIMENTO DE USO DE IMAGEM

Não se aplica.

APROVAÇÃO DE COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

Não se aplica.

CONFLITO DE INTERESSES

Não há conflitos de interesse.

LICENÇA DE USO

Este artigo está licenciado sob a [Licença Creative Commons CC-BY](#). Com essa licença você pode compartilhar, adaptar, criar para qualquer fim, desde que atribua a autoria da obra.

HISTÓRICO

Recebido em: 24-08-2020

Aprovado em: 03-07-2021