

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ERODIBILIDADE DE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS COMPACTADOS : ESTUDO DE CASO NA FERROVIA DE INTEGRAÇÃO OESTE – LESTE (FIOL)

TROPICAL COMPACTED RESIDUAL SOILS ERODIBILITY: A CASE STUDY ON THE WEST-EAST INTEGRATION RAILWAY (FIOL)

Lidiane Hellen dos Santos SANTANA, Antonio Carlos Rodrigues GUIMARÃES, Maria Esther Soares MARQUES

Instituto Militar de Engenharia. Praça General Tibúrcio, 80 - Urca, Rio de Janeiro - RJ.
E-mails: lidiane.santos@ime.eb.br; guimaraes@ime.eb.br; esther@ime.eb.br

Introdução
Material e métodos
Área de estudo
Metodologia
Critério de Erodibilidade MCT
Resultados e Discussão
Análise da Erodibilidade conforme composição granulométrica e correlações entre os Sistemas de Classificação Geotécnica USCS e MCT
Análises química e mineralógica
Erodibilidade MCT
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Este artigo avalia a erodibilidade de dois solos residuais tropicais compactados originários de taludes da Ferrovia de Integração Oeste – Leste (FIOL) com base em critérios da caracterização física, ensaios químicos, mineralógicos, de infiltrabilidade e perda de massa por imersão modificada usando a metodologia MCT, em três condições de umidade: compactado na umidade ótima, pré-infiltrado e seco por 24 horas. Os critérios baseados nos limites de consistência e granulometria mostraram-se pouco confiáveis na avaliação da erodibilidade dos solos residuais tropicais. Os ensaios químicos e mineralógicos indicaram que as amostras são pouco intemperizadas, com comportamento não laterítico e baixa resistência à erosão. A hierarquia do potencial de erodibilidade, revelou que os solos classificados como não lateríticos, quando compactados, são menos resistentes aos processos erosivos em todas as condições de umidade. Concluiu-se que os solos não lateríticos são afetados pela erosão hídrica e não são adequados para aplicação em camadas do pavimento ferroviário, destacando a importância de uma análise mais abrangente para diferentes tipos de solos, considerando as mesmas condições de amostragem.

Palavras-chave: Erodibilidade. Metodologia MCT. Solos tropicais.

ABSTRACT - This article assesses the erodibility of two compacted tropical residual soils collected from cut slopes of the West-East Integration Railway (FIOL). The evaluation is based on criteria from physical characterization, chemical and mineralogical tests, infiltrability, and modified immersion loss experiments using the MCT methodology under three moisture conditions: compacted at optimum moisture content, pre-infiltrated, and dried for 24 hours. Criteria based on consistency limits and particle size analysis proved unreliable in evaluating the erodibility of tropical residual soils. Chemical and mineralogical tests indicated that the samples were slightly weathered, displaying non-lateritic behavior and low erosion resistance. The hierarchy of erodibility potential revealed that non-lateritic soils, when compacted, exhibit less resistance to erosive processes under all moisture conditions. It was concluded that non-lateritic soils are affected by water erosion and are not suitable for application in railway pavement layers, emphasizing the importance of a comprehensive analysis for different soil types, considering the same sampling conditions.

Keywords: Erodibility. Soil erosion. MCT Methodology. Tropical soils.

INTRODUÇÃO

A erodibilidade é um dos principais fatores condicionantes da erosão dos solos. Pode ser definida como a propriedade do solo que retrata a maior ou menor facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo (Bastos, 1999). Apesar de diversos estudos tenham sido desenvolvidos na área agrônômica acerca da erodibilidade dos solos, ainda existem lacunas em relação aos solos aplicados nas camadas do pavimento ferroviário, principalmente devido às diferentes condições de

estrutura do solo.

A busca de relações entre a erodibilidade dos solos e outras propriedades geotécnicas, o desenvolvimento de técnicas de ensaios e de critérios de avaliação da erodibilidade constituem os principais objetivos dos trabalhos de pesquisa presentes na literatura técnica. A maioria destes estudos são voltados a soluções de problemas da engenharia geotécnica relacionados a erosão hídrica de solos tropicais e subtropicais (Bastos et al., 2000).

A abordagem indireta da erodibilidade leva em conta algumas propriedades do solo, como a granulometria, plasticidade, propriedades químicas, densidade e quantidade de matéria orgânica presente nos solos (Wischmeier et al., 1971; Denardin, 1990; Silva et al., 2000, 2020). Entretanto, devido às peculiaridades apresentadas pelos solos tropicais e tendo em vista o seu comportamento mecânico e hidráulico, essas metodologias não são adequadas para aplicação nesse tipo de solo, pois, foram baseadas em solos provenientes de clima temperado.

Silva et al. (2015) afirmam que para avaliar a erodibilidade de solos tropicais podem ser utilizados parâmetros físicos e propriedades geotécnicas desses solos, facilmente determinadas em laboratório. Além disso, a metodologia MCT estabelece um método especialmente desenvolvido para classificar e verificar o comportamento geotécnico de em regiões tropicais, de clima quente e úmido, sendo atrelado um sistema que é capaz de avaliar a erodibilidade dos solos brasileiros. Adotando esse tipo de abordagem, a partir de ensaios de caracterização física e da metodologia MCT, é possível enquadrar os solos tropicais em grupos distintos com características e peculiaridades semelhantes e classificá-los em diferentes sistemas de classificação.

Inúmeros autores estudaram o potencial erosivo dos solos por meio de parâmetros de

laboratório e pela metodologia MCT (Nogami & Villibor, 1979; Pejon, 1992; Couto & Gomes; Da Silva et al., 2015, 2019; Menezes & Pejon, 2010; Paes, 2017). Em todos os casos, foi constatado que os solos lateríticos (mais intemperizados) são mais resistentes aos agentes erosivos, e os solos que não se classificam nessa categoria tem maior suscetibilidade à erosão, sendo necessárias medidas de controle para evitar sua exposição direta ao intemperismo.

Diversos autores estudaram solos de cortes utilizados em trechos efetivamente executados e monitorados com solos finos lateríticos em camadas do pavimento ferroviário (Delgado, 2012; Sousa, 2016; Menezes, 2018; Guimarães et al. 2021).

Entretanto, do ponto de vista da erodibilidade, o comportamento desses materiais ainda precisa ser melhor compreendido para que, por fim, seja proposto um novo critério de selecionamento de materiais para aplicação nas camadas de infraestrutura ferroviária considerando as peculiaridades de comportamento dos solos tropicais.

Diante do exposto, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar o potencial erosivo de solos residuais compactados utilizando-se de ensaios da metodologia MCT e de parâmetros geotécnicos físico-mecânicos. Para tanto, foram analisados dois solos residuais coletados ao longo dos taludes de corte da Ferrovia de Integração Oeste–Leste (FIOL) do lote 6F.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

As amostras coletadas para análise neste estudo, estão situadas no município de Correntina – BA, às margens da construção do Lote 6F da Ferrovia de Integração Oeste – Leste e fazendo limite com o município de Santa Maria da Vitória - BA, conforme ilustra a figura 1.

A região está inserida na unidade geomorfológica do Chapadão Central, modelado sobre rochas arenosas do Grupo Urucuia. O processo morfogenético mais atuante é o escoamento superficial, com intenso transporte de sedimentos e lixiviação de materiais para as regiões deprimidas, com conseqüente influência na constituição dos solos dessas áreas (Bahia, 1995).

Conforme apresenta a figura 2, essa área é formada predominantemente por coberturas coluvionares e aluvionares, que ocorrem como depósitos aluvionares associados principalmente aos três grandes rios da região, sendo eles:

Correntina, Arrojado e Formoso, e, coluvionares oriundos de sedimentos erodidos das rochas do Grupo Bambuí e com grande contribuição do retrabalhamento dos arenitos do Grupo Urucuia (Santos, 2014).

De acordo com Santos (2014), as principais classes que ocorrem no relevo da região são os nitossolos, cambissolos e latossolos vermelho – amarelos. Em geral, são solos predominantemente argilosos, visto que a maioria dos materiais encontrados são provenientes de litologias argilosas e carbonáticas.

O clima da região é tropical com estação seca, caracterizando-se como subúmido com chuvas de verão, período seco bem definido no inverno e vegetação predominante de cerrado, variando de porte arbóreo - denso a gramíneo – lenhos (Bahia, 1995), e as temperaturas médias variam de 22 graus Celsius no inverno e 27 graus Celsius no verão.

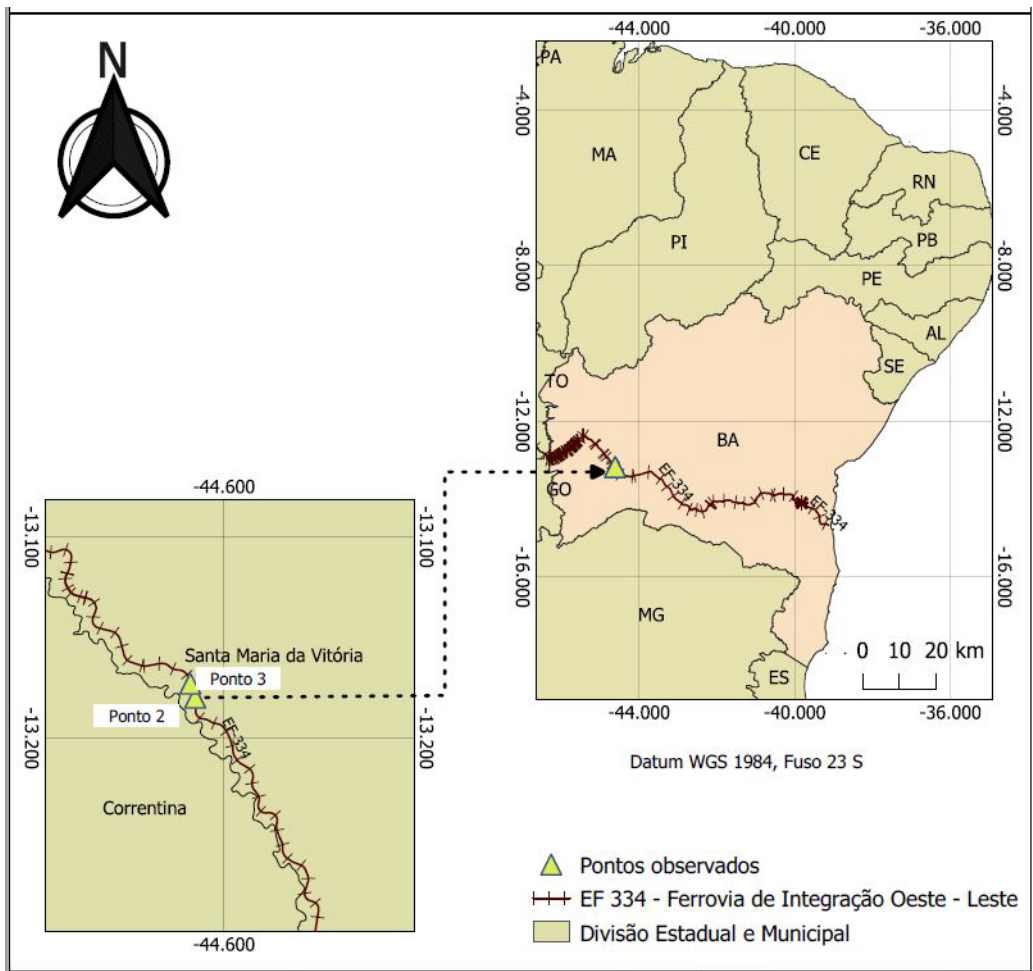


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

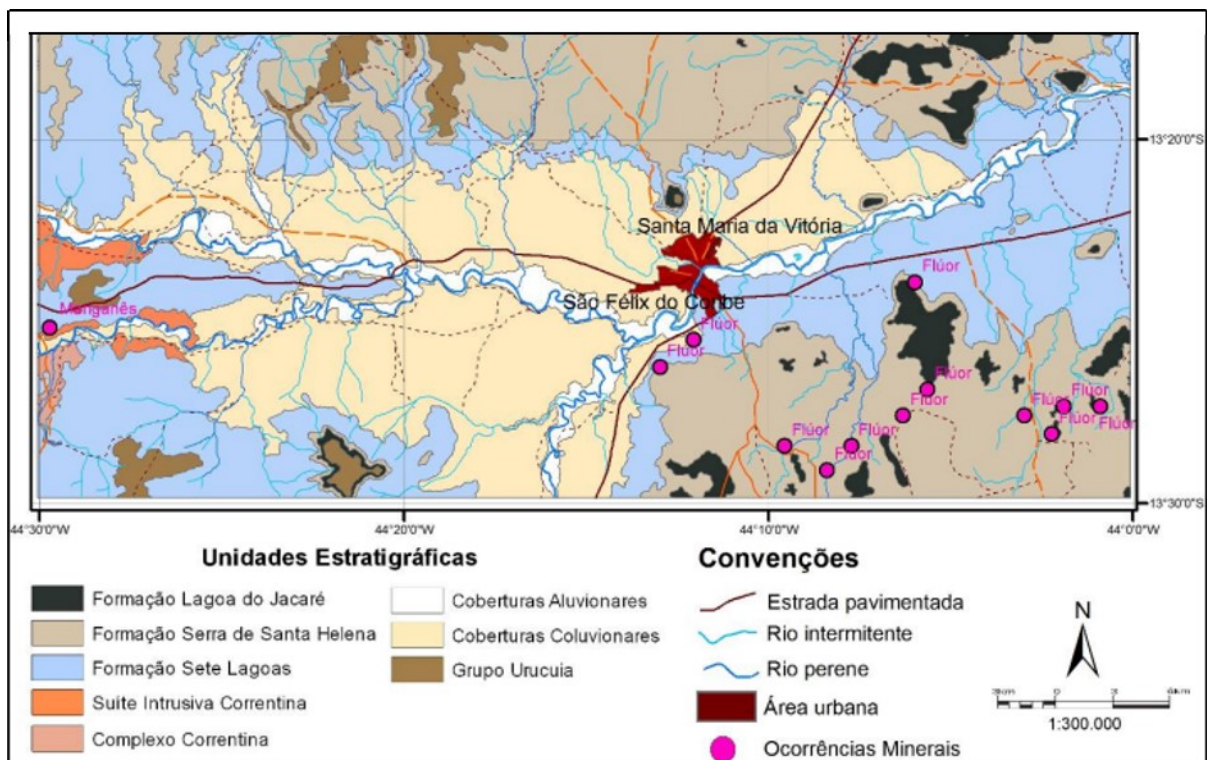


Figura 2 - Mapa geológico da área de estudo (Santos, 2014).

A figura 3 e a tabela 1 exibem as identificações da coleta das amostras, tais como a catalogação, data e local da extração, além das características táteis visuais.



Figura 3 - Perfil de coleta dos solos residuais estudados

Tabela 1- Detalhamento do procedimento de coleta das amostras

Amostra	Catologação	Data	Local da coleta	Descrição tátil visual
Amostra 2	Ponto 2	10/11/2021	Acesso à passagem de Gado	Apresenta granulometria fina com ocorrência de linha de pedregulho
Amostra 3	Ponto 3	10/11/2021	Jazida Tabocas	Material de coloração marrom amarelada, visualmente arenoso com fração de pedregulho laterítico

Metodologia

Para a execução dos ensaios, as amostras foram preparadas conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457 (ABNT, 2016b). Afim de caracterizar os solos coletados, foram realizados os seguintes ensaios em laboratório: (a) NBR 7181 - Solo: análise granulométrica (ABNT, 2018); (b) NBR 6459: Solo: Determinação do limite de liquidez (ABNT, 2016b); (c) NBR 7180 - Solo: Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016f) e (d) DNER 093/94 - Solos: Determinação da densidade real.

Em posse dos resultados obtidos, os solos foram classificados conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS - Unified Soil Classification System), descrito pela norma D2488 (ASTM, 2009). Além disso, com os dados da granulometria e do IP, determinou-se o Índice de Atividade (Ia), pela relação entre o IP sobre o percentual de argila (fração < 2), conforme Skempton (1953). Com esses dados é possível classificar os solos segundo a plasticidade e o índice de atividade, conforme indicado na tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos solos pela plasticidade (Burmister, 1949) e índice de atividade (Skempton, 1953).

Classificação da Plasticidade		Classificação de Índice de Atividade	
IP	Classificação	Ia - Índice de Atividade	Classificação
0	Não plástico	$Ia < 0,75$	Inativa (argila 1:1)
1 a 5	Ligeiramente Plástico		
5 a 10	Plasticidade baixa	$1,23 > Ia > 0,75$	Atividade normal
10 a 20	Plasticidade média		
20 a 40	Plasticidade alta	$Ia > 1,25$	Ativa (2:1)
>40	Plasticidade muito alta		

A análise do comportamento laterítico dos solos foi realizada pela classificação geotécnica de solos tropicais (MCT), conforme os procedimentos descritos na norma DNER-CLA 259 (DNER, 1996).

As amostras foram submetidas à compactação e perda de massa por imersão conforme os procedimentos estabelecidos nas normas DNER - ME 258 – Solo: Compactação por equipamento miniatura (DNER, 1994a) e DNER – ME 256 – Solo: determinação de perda de massa por imersão (DNER, 1994b).

Para a identificação, caracterização e quantificação das fases cristalinas dos minerais que compõem os solos, foi realizado o ensaio de Difração de Raio-X. As amostras utilizadas foram do tipo pó, peneiradas previamente na peneira de malha #200, que foram posteriormente inseridas no difratômetro da marca X'Pert PRO PANalytical por um tempo mínimo de duas horas de varredura.

A partir da análise do espectrograma obtido e considerando os resultados da caracterização química (elementos e óxidos), foram identificadas as fases cristalinas das amostras através da técnica quantitativa de fases pelo programa computacional da *HighScorePlus*.

A análise química foi realizada por meio do ensaio de fluorescência de raios-X (FRX), uma técnica analítica conhecida que investiga os elementos químicos dos materiais argilosos por emissão de raios-X e exerce um importante papel na caracterização geoquímica dos minerais.

Critério de erodibilidade MCT

Nogami & Villibor (1979) desenvolveram esse critério para avaliação de solos tropicais e

subtropicais perante à erosão com base em dois parâmetros: a infiltrabilidade, em que é obtido o coeficiente de sorção (s) e a erodibilidade específica em que é obtido o coeficiente de perda de massa por imersão (π). Esses autores estabelecem que a relação π/s igual a 52 é o limite do critério de erodibilidade, em que os solos que possuem $\pi/s \geq 52$ são considerados erodíveis e os solos com $\pi/s \leq 52$ são considerados com média a baixa erodibilidade.

Este valor limite foi modificado por Pejon (1992), mediante à utilização de amostras indeformadas e a consideração do efeito de secagem, o que possibilita inferir propriedades de desagregabilidade e infiltração do solo, sendo assim, o autor propôs uma mudança no valor do critério para π/s igual a 40.

O coeficiente de sorção (s) foi determinado pelo ensaio de infiltrabilidade, que visa mensurar a velocidade de ascensão capilar em amostras de solo com o decorrer do tempo. Para a realização do ensaio, as amostras deformadas foram compactadas conforme o procedimento de compactação dinâmica em equipamento miniatura previsto na norma DNER-ME 228 (1994) e moldados na energia intermediária. Nesse método, as amostras de solo foram ensaiadas em três condições: umidade ótima, secas ao ar (por 72 horas, no mínimo) e pré – infiltrada por 24 horas.

O equipamento para a realização do ensaio é composto por um plano de madeira, em que são acopladas régua graduada e tubos capilares de vidro com 6,0 mm de diâmetro, interligados a um reservatório composto por pedra porosa de granulação aberta com topo livre, onde são posicionadas as amostras de solo (Figura 4).



Figura 4 - Ensaio de infiltrabilidade pela Metodologia MCT.

Inicialmente, o tubo capilar é preenchido por água até que seja extravasado no topo do reservatório da pedra porosa. Após o transbordamento, é colocado no topo do reservatório um papel filtro, e logo após as amostras de solo deformadas confinadas em seus moldes cilíndricos são posicionadas sobre o filtro e o reservatório, de maneira que a entrada de água no solo ocorra unicamente pelo processo de ascensão capilar.

Posteriormente, foram realizadas as leituras dos deslocamentos do menisco dentro do tubo capilar seguindo uma relação de tempo quadrática (1, 2, 4, 9, 16, 25, 49, etc.), em minutos, até o momento em que foi cessado o deslocamento.

Com base na distância percorrida no tubo capilar (em cm) e da raiz quadrada do tempo ($\text{min}^{1/2}$) foi possível definir uma curva (distância percorrida \times $\text{tempo}^{1/2}$) que tem comportamento normalmente bilinear, com trecho inicial retilíneo e estabilização horizontal. O coeficiente de sorção (s) é calculado pela inclinação do trecho retilíneo inicial.

O ensaio de perda de massa por imersão

modificado foi determinado a partir de amostras compactadas, que foram posteriormente imersas em água para avaliação do potencial de desagregação do solo, e, semelhantemente ao ensaio de infiltrabilidade, as amostras de solo foram ensaiadas em três condições: umidade ótima, secas ao ar (por 72 horas, no mínimo) e pré – infiltrada por 24 horas.

Os materiais foram confinados em anéis cilíndricos de PVC, com dimensões similares às estabelecidas originalmente pela Metodologia MCT, diferenciando-se pela redução das alturas dos corpos de prova de 5,0 cm para 2,5 cm e colocando-se papel filtro e pedra porosa na parte interna do anel. Os corpos de prova foram submersos em reservatório com água durante um período mínimo de 20 horas, e o material desagregado foi coletado em cápsulas posicionadas abaixo do corpo de prova. Após o término do ensaio, a amostra coletada foi levada à estufa para a determinação da massa seca desprendida. A perda de massa por imersão (pi) foi determinada com a relação da massa total do solo seco e a massa seca desprendida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise da Erodibilidade conforme composição granulométrica e correlações entre os Sistemas de Classificação Geotécnica USCS e MCT

Os resultados dos ensaios de caracterização física das amostras de solos coletadas são apre-

sentados na tabela 3, e na tabela 4 são apresentados os resultados da classificação geotécnica sob os aspectos dos sistemas de classificações geotécnicas tradicionais (USCS) e da MCT.

Tabela 3 - Caracterização física das amostras de solos analisadas.

Amostra	Composição Granulométrica (%)					Índices Físicos			Limites de Atterberg			Atividade (As)
	Areia			Silte (%)	Argila (%)	Wótima (%)	Ydm _{max} (g/cm ³)	Gs (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	
	Grossa (%)	Média (%)	Fina (%)									
AM2	1	6	69	12	11	11,5	2,02	2,613	24	13	11	0,92
AM3	1	14	77	3	6	11,4	2,02	2,627	NL	NP	0	0

LL – Limite de liquidez; LP – Limite de Plasticidade; IP – Índice de Plasticidade.

Tabela 4 - Classificações geotécnicas das amostras de solos analisadas.

Amostra	Classificação USCS	Classificação MCT
AM2	CL	NG'
AM3	SM	NA'

CL-Argila-baixa compressibilidade; SM–Areia siltosa; NG' -Solo argiloso não laterítico; NA' -Solo arenoso não laterítico.

Através da tabela 3, percebe-se que a fração areia fina foi predominante nas duas amostras de solo. Tratam-se de materiais com propriedades dispersivas quando em contato com água e baixa capacidade de agregação das partículas (Wischmeier et al., 1971). Soares et. al, (2018)

encontraram resultados equivalentes ao avaliar o potencial erosivo de taludes de corte no município de Bom Jardim – RJ, Brasil.

Com relação aos Limites de Atterberg, a amostra AM2 obteve LL de 24,00%, LP de 13,00% e, portanto, IP de 11,00%, sendo classificada com

plasticidade média segundo Burmister (1949).

Já a amostra AM3 obteve LL classificado como não líquido (NL) e LP e IP como não plástico (NP). Portanto, considerando os valores observados para os limites de consistência o solo da amostra AM3 e os parâmetros estabelecidos por Bastos (1999), este material é considerado com maior potencial erosivo do que a amostra AM2.

Apesar de servirem como parâmetro para análise da resistência a erosão (Igwe & Ejiofor, 2005; Nandi & Luffman, 2012), esses índices por si só não podem ser utilizados como absolutos para identificar solos erodíveis, pois, além do comportamento de plasticidade dos solos é necessário analisar o conteúdo de partículas finas e a mineralogia.

A tabela 5 apresenta as correlações entre os

sistemas de classificação USCS e MCT em relação às amostras analisadas. Ao comparar os resultados da tabela 4 com a tabela 5, observa-se que não são totalmente adequados com as correlações propostas por Nogami & Villibor (1995). Verifica-se que a amostra AM2 designada como CL na classificação unificada (USCS) foi enquadrada em um grupo da metodologia MCT (NS'), diferente do que foi encontrado na execução do ensaio. Silva et. al (2012) encontraram resultados semelhantes, e também verificaram que os solos classificados como CL não se enquadram nos grupos que demonstram características argilosas (NG' e LG'). Entretanto, verificou-se que os materiais granulares (SC-SM e SC) são agregados em subgrupos que apresentam características não lateríticas.

Tabela 5 - Agrupamento de solos entre a Metodologia MCT e o Sistema USCS (Adaptado de Nogami e Villibor (1995).

Classificações geotécnicas tradicionais	Classes e grupos da classificação MCT						
	NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
	Areia não laterítica	Solo arenoso não laterítico	Solo siltooso não laterítico	Solo argiloso não laterítico	Areia laterítica	Solo arenoso laterítico	Solo argiloso laterítico
USCS	SP	SM	SM				MH
	SM	SC	CL	MH	SP	SC	ML
		ML	ML	CH	SC		CH
			MH				

Já para a amostra AM3 classificada como SM, verificou-se o enquadramento em três subgrupos diferentes da metodologia MCT (NA, NA' e NS') de características distintas.

Os resultados comprovam que a composição granulométrica e a natureza do argilomineral é determinante no comportamento do solo. Silva et al. (2012) destacam que solos classificados segundo os sistemas tradicionais de classificação podem ser enquadrados em diferentes subgrupos da metodologia.

Vale ressaltar que os sistemas de classificação internacionais apresentam limitações quando aplicados aos solos tropicais e, também, no comportamento geomecânico dos mesmos

Levando em conta a classificação MCT (Tabela 4), a amostra AM2 e a amostra AM3 não apresentaram características lateríticas, foram classificadas como NG' (não laterítico argiloso) e NA' (não laterítico arenoso) respectivamente, evidenciando baixa resistência à erosão.

Pejon (1992) apresenta uma hierarquia quanto ao potencial de erodibilidade para a classificação MCT em relação às propriedades mecânicas e hídricas de amostras compactadas da seguinte forma, em que o potencial de erodibilidade é

decrecente da esquerda para direita: $NA > NA' > NS' > NG' > LA > LA' > LG$. Observando esta série é possível verificar que os solos lateríticos são mais resistentes à erodibilidade do que os solos não lateríticos.

Nesse sentido, considerando a classificação MCT de ambas amostras, conclui-se que os dois tipos de solos devem apresentar um elevado grau de erodibilidade.

Porém, segundo a hierarquia proposta, a amostra AM2 com comportamento não laterítico argiloso tende a apresentar uma menor susceptibilidade à erosão do que a amostra AM3 (solo não laterítico arenoso).

Apesar dos resultados afirmarem que ambos os solos apresentam baixa resistência aos processos erosivos por não serem lateríticos, pode-se reforçar a importância da utilização da classificação geotécnica, fundamentada na metodologia MCT em relação aos sistemas tradicionais de classificação.

Análises química e mineralógica

Para a análise geoquímica por fluorescência de raio X foram utilizadas as frações de solo passantes na peneira #40 são apresentados na tabela 6. Foram calculados os coeficientes K_f e

K_i que fornecem a relação sílica-sesquióxido de ferro e alumínio.

Desta forma, de acordo com Gidigas (1976) esses coeficientes podem ser utilizados para fins

de classificação dos solos como lateríticos ou não. Além disso, quanto maiores os coeficientes, menor será o grau de intemperismo do solo e, consequentemente, menor será sua resistência à erosão.

Tabela 6 - Teores de elementos majoritários determinados por fluorescência de raio X e parâmetros K_i e K_r calculados.

Amostra	Óxidos Majoritários (%)				K_i	K_r	Classificação	Intemperismo
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Outros (%)				
AM2	84,47	8,43	4,07	1,48	17,03	13,03	Não laterítico	Pouco
AM3	86,95	5,04	5,00	0,25	29,33	17,97	Não laterítico	Pouco

Ao analisar as amostras coletadas, concluímos que ambas se apresentam pouco intemperizadas, pois possuem coeficientes K_i e K_r altos, ou seja, maior concentração de SiO₂ e menores teores de Fe₂O₃ e Al₂O₃, e, como resultado menor resistência à erosão.

Para a amostra AM2 obtiveram-se os valores de 13,03 e 17,03, para as relações sílica-sesquióxido de ferro e alumínio, e sílica-alumina, respectivamente. Já a amostra AM3, os valores desses coeficientes foram, respectivamente, 17,97 e 29,33 conforme a tabela 6. De acordo os

parâmetros estabelecidos por Gidigas (1976), os solos com relação sílica-sesquióxido de ferro e alumínio menor que 2 são classificados como lateríticos, caso contrário são denominados como não lateríticos, nesse sentido, as duas amostras foram classificadas como não lateríticas.

Os resultados da difração de raios-X das partículas finas das amostras (Figuras 5 e 6) mostraram ocorrências de minerais primários, com maiores picos de quartzo para as duas amostras e pequenas porcentagens óxidos de ferro e alumínio em sua composição.

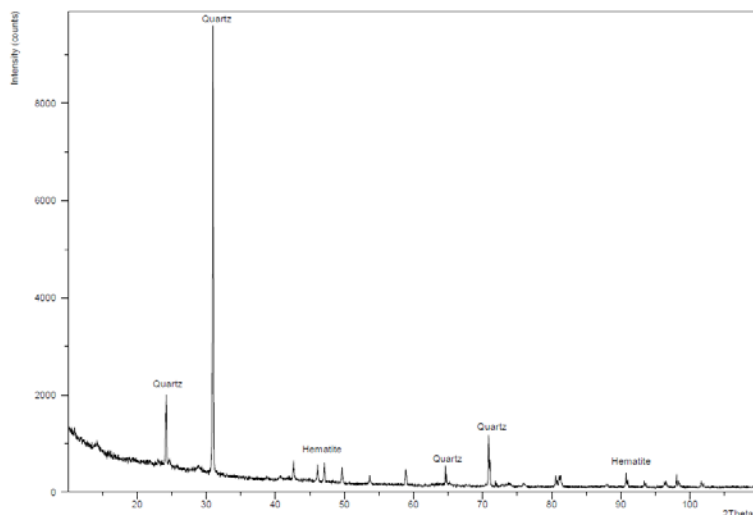


Figura 5 - Difratoograma AM2.

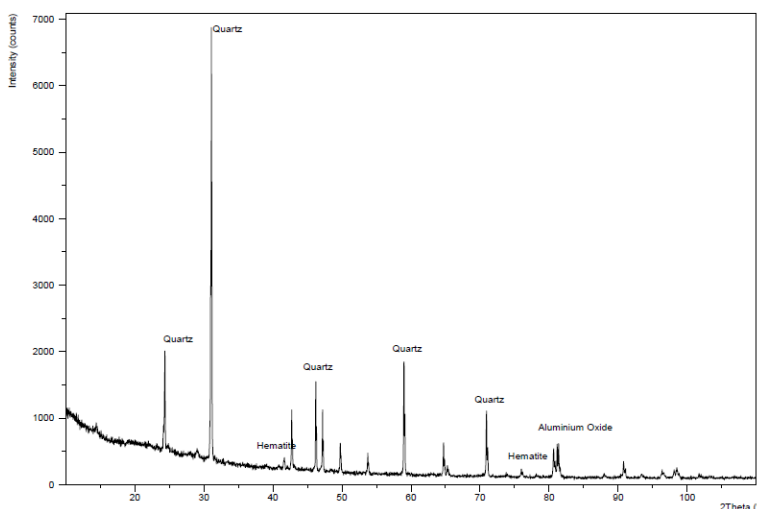


Figura 6 - Difratoograma AM3.

Erodibilidade MCT

A tabela 7 mostra os resultados obtidos nos ensaios de infiltrabilidade e perda de massa

por imersão em água modificada, bem como as respectivas relações π/s para as amostras de solos compactadas analisadas.

Tabela 7 - Valores de coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (π) para diferentes condições de umidade das amostras - Critério da Metodologia MCT.

Amostra	Umidade Ótima			Seca ao ar			Pré- infiltrada		
	s^* (cm/min ^{1/2})	π (%)	π/s (cm/min ^{1/2}) [†]	s^* (cm/min ^{1/2})	π (%)	π/s (cm/min ^{1/2}) [†]	s^* (cm/min ^{1/2})	π (%)	π/s (cm/min ^{1/2}) [†]
AM2	0,009	38,89	4231	0,025	54,7	2182	0,008	8,38	1014
AM3	0,696	36,00	51	0,018	44,00	2425	0,054	41,89	783

Foram identificados valores pouco significativos dos coeficientes de sorção em todas as condições de umidade para a amostra AM2, indicando uma velocidade reduzida de ascensão capilar da água nesse material, ou seja, apresenta baixa capacidade das amostras em infiltrar a água da chuva, facilitando a formação de fluxo superficial e o transporte de partículas. Já a amostra AM3 apresentou o coeficiente de sorção razoavelmente elevado na condição ótima de compactação, e, para as outras condições apresentou comportamento semelhante aos resultados encontrados para a amostra AM2.

Segundo Couto & Gomes (2020) e Couto et al. (2021) os solos resistentes têm baixa perda de massa, um valor máximo de 15%. Em contraste, os solos erodíveis apresentam altas perdas de massa, chegando a 80% devido a granulometria, presença de minerais micáceos e baixa coesão. Dessa forma, observou-se que para ambas as amostras, em todas as condições de umidade, a perda de massa foi alta, destacando que se obtiveram maiores valores na condição seca. Destaca-se que a amostra AM3, na condição pré-infiltrada apresentou uma perda de massa baixa, semelhante aos resultados encontrados por

Damasceno et al. (2018) em amostras de solo classificadas como NS' dos municípios de Santo André e Ribeirão Pires - SP.

Além disso, vale destacar que Menezes & Pejon (2010) afirmam, em caráter geral, que quanto mais seco estiver um solo, maior será a perda de massa por imersão, ou seja, o efeito de secagem do solo associa-se ao aumento da sua suscetibilidade à erosão. Ademais, segundo esses autores, solos com altas perdas de massa por imersão em água são, em geral, altamente susceptíveis à erosão.

A figura 7 mostra o enquadramento do índice π/s segundo os critérios propostos por Nogami & Villibor (1995) cuja relação deve ser superior a 52 para que o solo seja classificado como não erodível, e por Pejon (1992), em que esse valor é reduzido para 40. Ao aplicar os limites propostos para as amostras de solo analisadas, observa-se que, apenas as amostras de solo AM3 e AM2 são consideradas como erodíveis independente da condição de umidade.

Bastos (1999) e Paes (2017) dentre outros autores, encontram observações semelhantes a esses resultados para solos com as mesmas características.

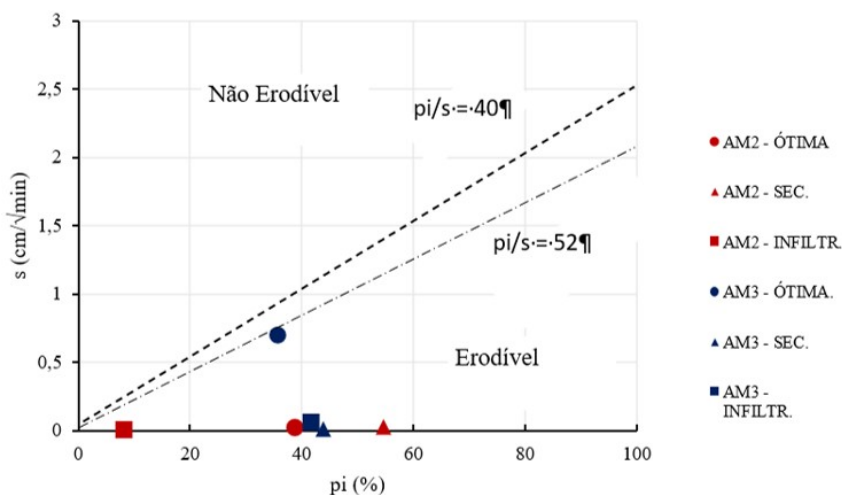


Figura 7 - Gráfico de enquadramento do índice π/s para análise da erodibilidade dos solos.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesta pesquisa permitiram verificar a resistência erodibilidade de dois solos não lateríticos coletados às margens da Ferrovia de Integração Oeste Leste (EF -334) através de suas características granulométricas, química e mineralógicas pelos de critérios estabelecidos pela metodologia MCT.

Em relação a hierarquia proposta por Pejon (1992), com base na metodologia MCT, verificou-se que a análise foi adequada para os solos analisados, confirmando que os solos não lateríticos apresentam baixa resistência à erosão. Além disso, as análises químicas e mineralógicas foram fundamentais, indicando que os solos menos

intemperizados apresentam menor resistência aos processos erosivos.

No ensaio de perda de massa por imersão modificado, foi possível verificar que quando as amostras de solo estão no estado seco, apresentam maior potencial de erodibilidade do que pré-infiltrada, portanto, conclui-se que o potencial de erodibilidade das amostras de solos analisadas aumenta com a diminuição do grau de saturação.

O critério proposto na metodologia MCT apresentou resultados satisfatórios, evidenciado que os solos não lateríticos são mais suscetíveis aos processos erosivos, devido, principalmente, aos elevados valores de perda de massa registrados.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro. 5 p., 2016b.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro. 3 p., 2016c.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro. 12 p., 2016a.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. D2488: Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure). ASTM International. West Conshohocken, PA., 2009.
- BAHIA - Superintendência de Recursos Hídricos. **Plano Diretor de Recursos Hídricos: Bacia do Rio Corrente**. Salvador: Higesa. v.10. Documento síntese, 1995.
- BASTOS, C.A.B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Porto Alegre, 303 p, 1999. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BASTOS, C.A.B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W.Y.Y. **A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico - pesquisas e tendências**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, Rio Grande/RS, v. 1, p. 17-26, 2000.
- BURMISTER, D.M. Principles and techniques of soil identification. **Proceedings of Annual Highway Research Board Meeting, National Research Council**, v. 29, p. 402-434, 1949.
- COUTO, B.O.C. & GOMES, R.C. Application of mct methodology to determine soil erodibility in road cutting slopes in quadrilátero ferrífero region. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 1, p. 191-198, 2020.
- COUTO, B.O.C.; GOMES, R.C.; FERREIRA, L.D. Erodibility evaluation in different horizons in oxisols through the undrained shear strength in the field: Case study in the Quadrilátero Ferrífero Region – MG, **Geociências**, v. 40, n. 1, p. 169-180, 2021.
- DA SILVA, T.O.; NASCIMENTO, R.C.; SOUZA FARIA, J.W.; PITANGA, H.N.; DE LIMA, D.C.; SANT'ANNA, G.L. Soil susceptibility to accelerated hydric erosion: Geotechnical evaluation of cut slopes in residual soil profiles. **Acta Scientiarum - Technology**, v. 37, n. 4, p. 331-337, 2015.
- DA SILVA, T.O.; NETO, S.L.S.D.; FERRAZ, R.L.; PITANGA, H.N.; PAES, B.S.T. Susceptibility to erodibility of residual soils based on correlations of physical-mechanical geotechnical properties. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 188-195, 2019.
- DAMASCENO, A.D.O.; SANTOS, P.; PAIVA, C. Previsão do Comportamento Erodível de Quatro Solos Pertencentes às Áreas com Potencial para Expansão Urbana nos Municípios de Santo André e Ribeirão Pires-SP através da Metodologia MCT (Miniatura, Compactada, Tropical). IN: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA GEOTECNIA E DESENVOLVIMENTO URBANO, 2016, Belo Horizonte. **Atas...Belo Horizonte: ABMS**, 2016, v. 18.
- DELGADO, B.G. **Análise da deformabilidade de um solo tropical do oeste do Maranhão como material de sublastro na Estrada de Ferro Carajás**. Ouro Preto, 2012. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto.
- DENARDIN, J.E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. Piracicaba, 113 p., 1990. Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz- Universidade de São Paulo.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. CLA 259: Classificação de Solos Tropicais para Finalidades Rodoviárias Utilizando Corpos-de-prova Compactados em Equipamentos Miniatura. Rio de Janeiro. 6 p. 1996.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 093: Solos: Determinação da densidade real. Rio de Janeiro. 4 p., 1994d.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 228: Solo - Compactação em equipamento miniatura. Rio de Janeiro. 14 p., 1994.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 256: Solos Compactados com Equipamentos Miniatura – Determinação da Perda de Massa por Imersão. Rio de Janeiro. 6 p., 1994d.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 258: Solos Compactados com Equipamentos Miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro. 14 p., 1994c.
- GIDIGASU, M.D. Laterite Soil Engineering. **Developments in Geotechnical Engineering**. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1976.
- GUIMARÃES, A.C.R.; SILVA FILHO, J. C.; CASTRO, C.D.

- Contribution to the use of alternative material in sub-ballast layer of heavy haul railroad. **Transportation Geotechnics**, v. 30, p. 100524, 2021
- IGWE, C.A. & EJIUFOR, N. Structural stability of exposed gully wall in Central Eastern Nigeria as affected by soil properties. **International agrophysics**, v. 19, n. 3, p. 215-222, 2005.
- MENEZES, L.C. **Estudo da Influência da Água da Chuva na Plataforma Ferroviária**. Rio de Janeiro, Brasil, 2018. Dissertação (Mestrado), Instituto Militar de Engenharia.
- MENEZES, M.B.M. & PEJON, O.J. Analysis of influence of moisture content on the absorption of water and soil suction in studies of erodibility. **Geociências**, v. 29, n. 2, p. 211-228, 2010.
- NANDI, A. & LUFFMAN, I. Erosion related changes to physicochemical properties of Ultisols distributed on calcareous sedimentary rocks. **Journal of sustainable development**, v. 5, n. 8, p. 52, 2012.
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, v. 19, p. 196-199, 1979.
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. Erosão a faixa marginal. In: Nogami J. S. & Villibor, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. **Editora Villibor**, p. 169 – 196, 1995.
- PAES, B.S.T. **Avaliação Geotécnica de corte rodoviário em perfil de solos residuais quanto ao potencial de erodibilidade**. Viçosa, 131 p, 2017. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.
- PEJON, O.J. **Mapeamento geotécnico regional da falha de Piracicaba: estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos**. Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de São Carlos, Rio Grande do Sul, 1992. 241 p. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SANTOS, C.C. **Mobilidade de elementos químicos no perfil de solo e seu controle na prospecção geoquímica: Aplicação na região de Santa Maria da Vitória, BA**. Brasília. 2014. 132 p. Mestrado (Geologia Regional), Universidade de Brasília.
- SILVA FILHO, J.C. **Análise numérica do comportamento mecânico de um pavimento ferroviário para diferentes tipos de veículos**. Ouro Preto, 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto.
- SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; LIMA, J.M.; FERREIRA, M.M. Avaliação de métodos indiretos de determinação de erodibilidade de latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 6, p. 1207-1220, 2000.
- SILVA, S.F.; SILVA, T.O.; PITANGA, H.N.; DIAS, L.S. Estudo Comparativo entre os sistemas tradicionais de classificações geotécnicas de solos e a classificação MCT. 2012. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Anais...** Cobramseg, 2012, v. 16.
- SILVA, T.O.; NASCIMENTO, R.C.; FARIA, J.W.S.; PITANGA, H.N.; LIMA, D.C.; SANT'ANNA, G.L. Soil susceptibility to accelerated hydric erosion: geotechnical evaluation of cut slopes in residual soil profiles. **Acta Scientiarum**. Technology, v. 37, n. 4, p. 331-337, 2015.
- SILVA, T.O.D.; PITANGA, H.N.; DIAS NETO, S.L.S.; FERRAZ, R.L.; PAES, B.S.T. Erosive potential of tropical soils using geotechnical tests for direct and indirect evaluation. **Geociências**, v. 39, n. 2, p. 573-584, 2020.
- SKEMPTON, A.W. Soil mechanics in relation to geology. **Proceedings of the Yorkshire Geological Society**, v. 29, n. 1, p. 33-62, 1953.
- SOARES, D.L.; POLIVANOV, H.; BARROSO, E.V.; DA MOTTA, L.M.G.; DE SOUZA, C.C. Soil erodibility on cutting slopes of unpaved roads. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 179-193, 2018.
- 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**. Rio de Janeiro, 2016, 222 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia.
- WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROS, B.V. A Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **J. Soil and Water Conservation**, v. 26, p. 189 – 193, 1971.

Submetido em 25 de julho de 2023

Aceito para publicação em 27 de fevereiro de 2024