

Avaliação do Potencial expansivo de solos da Formação Solimões no Estado do Acre para uso em Pavimentação

Swell potential of clays from Solimões formation for pavements at Western Amazonia

Victor Hugo Rodrigues Barbosa¹, Maria Esther Soares Marques¹,
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães¹, Marcos Valério Mendonça Baia²
Daniel Jardim Almeida¹

¹Instituto Militar de Engenharia, Praça Gen. Tibúrcio, 80, Urca, CEP: 22290270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

²Universidade Federal do Amazonas – Av. Gen. Rodrigo Octavio Jordão Ramos, 1200, CEP: CEP: 69067-005, Manaus – AM, Brasil.

e-mail: engbaia@gmail.com, victorhrb@gmail.com, esther@ime.eb.br, guimaraes@ime.eb.br; danieljardomalmeida@gmail.com.br.

RESUMO

Os principais aspectos geotécnicos da Formação Solimões no estado do Acre para a área de pavimentação rodoviária são: a escassez de pedras britadas, os elevados índices de precipitação e a ocorrência generalizada de solos expansivos ao longo do subleito. A alta variação volumétrica desses solos vem causando prejuízos financeiros e dificultando o transporte terrestre na região. Embora a maioria dos solos locais seja predominantemente composta por argilominerais com estrutura 2:1, a influência do comportamento desses solos em obras de pavimentação ainda é pouco estudada na região. Este artigo avalia 05 amostras de solos potencialmente expansivos coletados nos arredores da cidade de Rio Branco. São realizados, em amostras deformadas, os ensaios de caracterização física, Microscopia Eletrônica de Varredura, difratometria de raios-X, espectrometria de fluorescência de Raios-X e de absorção de azul de metileno. Por meio de correlações existentes, os resultados evidenciam o elevado potencial de expansão das amostras e a importância de um estudo e mapeamento mais abrangente que auxilie o meio técnico local em obras rodoviárias.

Palavras-chave: Solos Expansivos, Amazônia, Pavimentos Flexíveis.

ABSTRACT

The main geotechnical aspects of the southwestern Brazilian Amazon are the absence of rocky outcrops to provide gravel for road construction, the widespread occurrence of expansive soils along the road subgrade and high rainfall indices. The high volumetric changes of these expansive soils has been causing huge financial losses. Although most of the local soils are rich in 2:1 clay mineral, the understanding on how the behavior of these materials influences local pavements is still very limited. This paper assess 05 disturbed expansive clays samples of Rio Branco city. Physical, chemical and mineralogical characterizations are presented. The laboratory tests are then combined with traditional empirical correlations in order to evaluate the expansiveness of Rio Branco clays. The results showed the high swelling potential of the samples and the need of more studies that provides a clear understanding of these expansive clays.

Keywords: Expansive Soils, Amazon, Flexible Pavements.

1. INTRODUÇÃO

Solos expansivos são tipos específicos de solos argilosos não saturados que usualmente alternam aumento de volume por umedecimento e posterior redução por secagem, o que tende a ocorrer de forma cíclica, quase sempre devido a dinâmicas sazonais. De acordo com Ferreira *et al.* [1], a variação de volume que ocorre no terreno pode causar tensões indesejáveis nas estruturas em Obras de Engenharia, resultando em danos severos em edificações leves e pavimentos. Nos Estados Unidos, o prejuízo causado por solos expansivos chegou a ser estimado em até US\$ 9 bilhões por ano [2].

Em uma análise intrínseca, a expansividade de um solo é regida pelo tamanho e forma das partículas,

as quais variam em função de sua mineralogia, grau de agregação e interação química com a água adsorvida [3]. Contudo, a expansão é um fenômeno mais complexo que depende de uma grande variedade de fatores. Nelson e Miller [4] dividem esses fatores em três diferentes grupos: propriedades do solo (mineralogia, sucção, estrutura, densidade etc.); condições ambientais (variação de umidade, clima, drenagem, vegetação etc.); e estado de tensões (histórico de tensões, sobrecargas, perfil do solo, dentre outros).

Solos expansivos são registrados em todo o globo, especialmente em regiões áridas e semiáridas. No Brasil, trabalhos técnicos de diferentes áreas apontam a ocorrência desse material em várias regiões, abrangendo uma grande diversidade de solos e tipos climáticos, com uma predominância de registros na região nordeste [5]. Apesar de pesquisas nacionais apontarem diversas alternativas de tratamento, tal como a adição da cal visando estabilizar quimicamente a mistura [1, 6], ainda é limitado o número de trabalhos na região norte focados no comportamento desses solos em obras de Engenharia.

No estado do Acre há um grande histórico de obras de infraestrutura afetadas pela elevada expansibilidade do subleito (Fig. 1), a exemplo do principal eixo rodoviário estadual, rodovia BR-364 [7] e do Aeroporto da Capital Rio Branco [8, 9]. De acordo com levantamento do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, grande parte dos solos de Rio Branco é formada por argilitos da Formação Solimões, os quais são recobertos por espessas camadas de argilas expansivas de origem sedimentar cujo argilomineral predominante é a montmorilonita, o que resulta em problemas geológico-geotécnicos como movimentação de massa e danos em construções [10].



Figura 1: Registros de defeitos em pavimentos e edificações nos arredores de Rio Branco devido à elevada expansibilidade do subleito - (a) Trincas Longas Longitudinais em Pavimento flexível; (b) Trincas em contrapiso de edificação; (c) Soerguimento e trincas nos bordos de Pavimento Flexível.

O potencial expansivo dos solos do Acre não é definido apenas pelas características físico-químicas da fração argilosa, existindo também uma grande dependência das condições ambientais. O estado possui um período quente e seco, entre julho e agosto; e um período muito chuvoso, entre outubro e abril, havendo ainda muitas chuvas intermitentes de elevada intensidade em períodos de acentuado déficit de umidade no solo, onde as trincas superficiais facilitam a entrada da água no perfil pelos bordos das construções. Outro fator que contribui para a variação de sucção nos solos da região é a grande quantidade de cursos d'água combinada às enchentes sazonais, o que afeta principalmente os eixos rodoviários que os interceptam.

Uma das principais soluções de Engenharia para pavimentos construídos sobre depósitos de solos expansivos envolve o uso de agregados pétreos em drenos longitudinais, ou ainda como reforço do subleito, aumentando o confinamento do solo expansivo devido ao seu peso próprio e reduzindo a pressão de expansão. Contudo, Rio Branco registra a brita mais cara do país devido às elevadas distâncias de transporte para as principais pedreiras. De acordo com o SINAPI [11], enquanto o custo do m³ da Brita 01 em fevereiro de 2020 custava cerca de R\$ 245, em Manaus o valor era de R\$ 100 e no Rio de Janeiro cerca de R\$ 65. De maneira similar, alternativas para reduzir os efeitos dos solos expansivos envolvendo o uso de geossintéticos ou estabilizações químicas ainda são de uso limitado devido ao alto custo. Esse panorama denota a necessidade de estudos mais detalhados das características expansivas dos solos locais.

Há diversos métodos voltados para a estimativa da movimentação vertical em solos expansivos dentro de um período estipulado, os quais basicamente tentam correlacionar as características inerentes ao solo com a variação de umidade ou sucção ao longo de uma determinada profundidade de interesse chamada zona ativa [12]. Devido à escassez de equipamentos e laboratórios ou ao elevado custo da obtenção das medidas diretas dos parâmetros dos solos, muitos pesquisadores utilizam correlações empíricas com índices tradicionais da

engenharia, dados climáticos ou ainda outros métodos indiretos como Difração de Raios-X, Microscopia eletrônica de varredura, Geomorfologia, Identificação visual, dentre outros.

Nessa perspectiva, o objetivo deste trabalho é avaliar por meio de correlações empíricas o potencial expansivo de 05 amostras de solos que ocorrem nas adjacências da rodovia BR-364, próximo à cidade de Rio Branco. As amostras foram caracterizadas sob o ponto de vista físico, químico e mineralógico, tendo em vista contribuir com os estudos dos solos expansivos do Acre, ainda pouco estudados. Destaca-se ainda a relevância deste estudo para os projetos, construções e manutenções de futuras obras geotécnicas na região.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização da área de estudo

Localizada na Amazônia Oriental, na porção leste do estado do Acre, a região estudada está localizada no Município de Rio Branco (Fig. 02), na área de influência da rodovia BR-364 em direção ao Município de Sena Madureira. De acordo com a classificação de Köppen, predomina na região o clima AW, que corresponde a climas úmidos tropicais [13]. A temperatura média anual é de aproximadamente 24 °C, enquanto a precipitação média anual varia em torno de 1.700 a 2.400 mm [14].

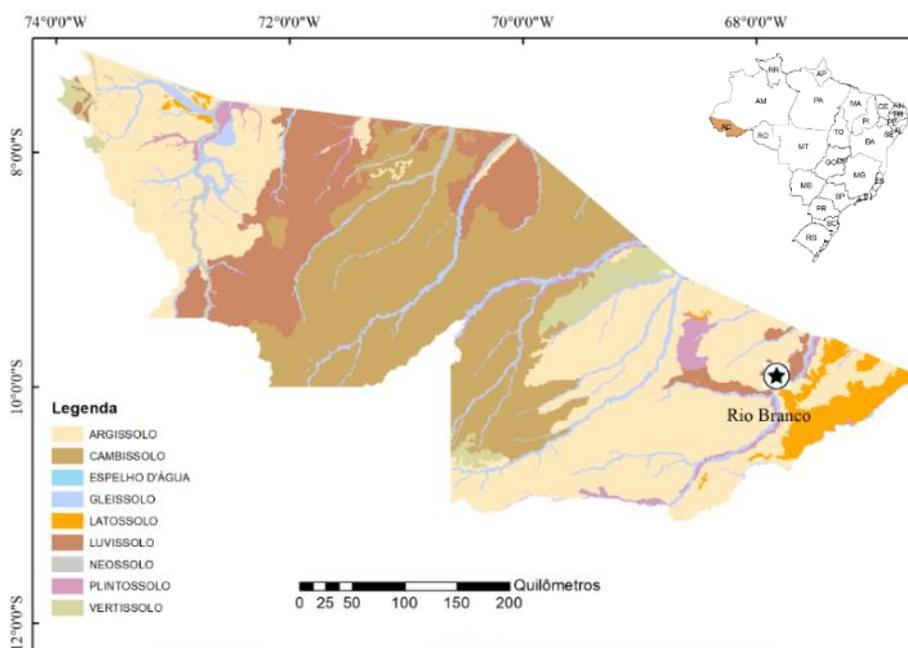


Figura 2: Localização do Município de Rio Branco [15].

Geologicamente, o substrato de Rio Branco é constituído por rochas sedimentares essencialmente argilosas da Formação Solimões, sobre a qual se encontra um pacote de sedimentos argilosos de coloração esbranquiçada a avermelhada, com espessuras variando entre 5 a 16 m, com predomínio de argilominerais do tipo 2:1 [10]. Do ponto de vista pedológico, de acordo com BARDALES [15], há maior ocorrência de argissolos e luvisolos na região de estudo, sendo este último solo caracterizado pela baixa capacidade de drenagem e a presença de argilas de alta atividade.

Diferente de grande parte da Amazônia brasileira, os solos do Acre possuem características aclimáticas, ou seja, com características inesperadas ou em desacordo com o clima atual. AMARAL [16] destaca que, embora sobre a influência do clima quente e úmido, a granulometria muito fina dos sedimentos resultam em uma drenagem deficiente, favorecendo o escoamento superficial e uma baixa taxa de lixiviação. Tais características permitem a manutenção de um pedoclima mais seco, reduzindo o intemperismo químico e condicionando a ocorrência de solos jovens.

2.2 Coleta das amostras

As amostras utilizadas nesta pesquisa foram coletadas em áreas nas margens da rodovia BR-364 (Fig. 3a), onde: AM-01 a AM-03 foram coletadas em loteamentos residenciais; AM-04 coletada no acostamento da rodovia, a cerca de 30 km da zona urbana; e a AM-05 coletada no aeroporto de Rio Branco. Os locais foram

escolhidos em função da observação de ocorrências possivelmente associadas a solos expansivos (Fig. 01).

Em alguns locais, observou-se ainda no terreno natural a ocorrência generalizada de trincas em um padrão poligonal, com aproximadamente 2,5 cm de espessura (Fig. 3b). Escavações *in loco* mostraram que essas trincas se estendiam até cerca de 60 cm de profundidade, tendo como fator gerador o ressecamento do solo causado pela evapotranspiração sazonal e por raízes da vegetação local. A presença de tais trincas afeta a variação de umidade no subleito, afetando diretamente a estrutura do pavimento caso não sejam previstos métodos adequados de drenagem subsuperficial.

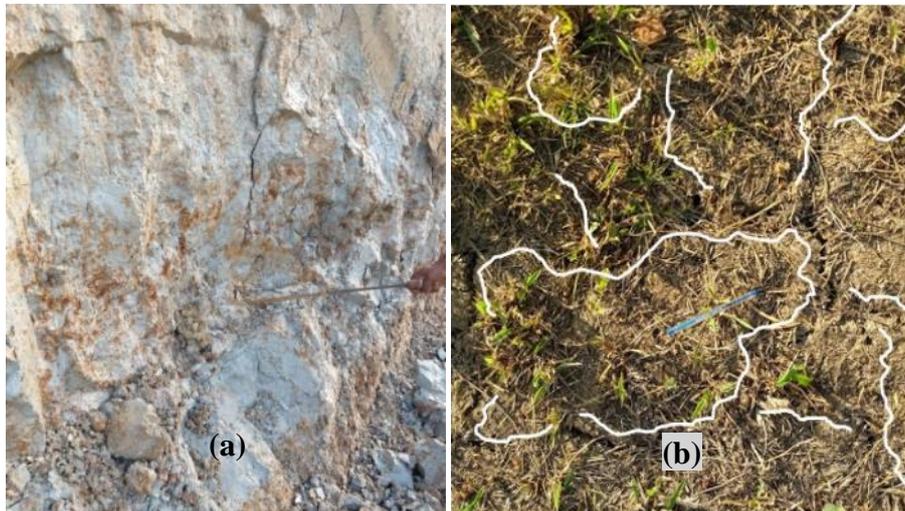


Figura 3: (a) Perfil característico do solo expansivo durante a etapa de coleta das amostras; (b) Ocorrência generalizada de trincas na superfície do terreno.

2.3 Caracterização física das amostras

Como primeira etapa de investigação, foram determinados os parâmetros físicos do solo no Laboratório de Solos da Universidade Federal do Acre (UFAC). Os ensaios para obtenção dos atributos físicos do solo realizados são de ampla disseminação no meio geotécnico internacional, permitindo correlacionar com ensaios mais específicos e prever o comportamento do solo em campo. Solos muito finos e com maior Índice de Plasticidade, por exemplo, possuem a tendência natural de apresentar maior expansividade.

2.4 Teor de Matéria Orgânica

A determinação da porcentagem de matéria orgânica nas amostras foi realizada no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) por meio do Método de Perda por aquecimento a 440 °C, conforme orientações da NBR 13600 [17].

2.5 Capacidade de Troca Catiônica – CTC

A determinação da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) das amostras de solo foi realizada no Laboratório de Geoquímica/ICE/UFAM através da técnica de adsorção de azul de metileno. Trata-se de um método simples e eficiente para indicar a presença de argilominerais expansivos, a qual está associada a elevados valores de adsorção do corante.

O CTC é o número total de cátions trocáveis necessários para balancear as cargas negativas na superfície dos argilominerais. No geral, o potencial de expansão aumenta com o aumento do CTC. Ou seja, elevados valores de CTC indicam a presença de argilominerais mais reativos como montmorilonitas, conferindo elevada atividade ao solo, enquanto baixos valores de CTC indicam a presença de argilominerais mais estáveis, a exemplo da caulinita, característica inerente a solos de baixa atividade. [18].

Nesta pesquisa utilizou-se o Método da mancha, desenvolvido por JONES [19], o qual consiste na mistura de uma suspensão de solo mais água, em meio agitado, com uma solução de azul de metileno. Gotejam-se doses dessa mistura em um papel-filtro padronizado, aumentando a dosagem de azul de metileno até que a solução resulte em uma aura azulada no bordo da mancha (ponto de viragem). A presença do excesso de corante evidencia que se atingiu a adsorção máxima das partículas, permitindo o cálculo da CTC, conforme Figura 4.

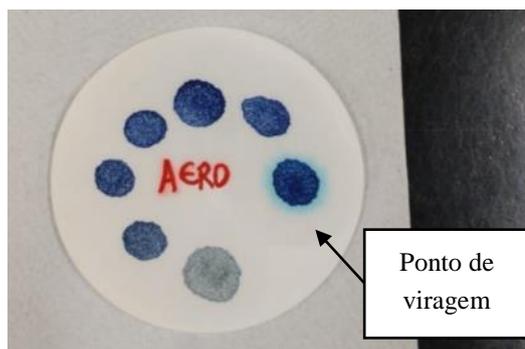


Figura 4: (a) Ponto de Viragem da Amostra 05 após concentração de 14 ml de azul de metileno.

2.6 Análise Química – FRX

As composições químicas em termos de óxido das amostras de solo foram determinadas no Laboratório Crowfoot de Métodos de Raio-X (EST/UEA), através da técnica de espectrometria de fluorescência de Raios-X (FRX) por dispersão de ondas, com a utilização do Espectrômetro Rigaku, modelo Supermini. As amostras foram analisadas em triplicata com um tempo de exposição da amostra à radiação de 720 segundos para cada amostra, a uma atmosfera de vácuo.

A concentração de determinados óxidos ou a relação entre eles fornece importantes indicadores para solos sedimentares, tais como o grau de intemperismo e a provável constituição mineralógica. Devido à estrutura 2:1 (sílica:alumina), as esmectitas são formadas em condições onde a sílica (SiO_2) é abundante, a exemplo das estruturas floculadas formadas entre a sílica e a alumina. Tais condições são favorecidas por alto pH, alta concentração eletrolítica e a presença de maiores concentrações de Mg^{2+} e Ca^{2+} que Na^+ e K^+ . Além disso, condições climáticas onde a evapotranspiração excede a precipitação, locais mal drenados e de baixa lixiviação também favorecem à formação da esmectita.

Outro indicativo é que esses solos apresentam uma relação molecular entre o SiO_2 e Al_2O_3 maior que 2 [20], uma vez que valores abaixo são indicativos de solos lateríticos, os quais são constituídos essencialmente por argilominerais mais estáveis, como a caulinita.

Nesse sentido, uma das maneiras de avaliar o comportamento pedológico do material é separar solos argilosos muito intemperizados, a exemplo dos plintossolos e latossolos, de solos com argilominerais mais expansivos. Nesta pesquisa utilizou-se o índice de intemperismo K_i , conforme a relação molecular e valores limites indicados no Manual Técnico de Pedologia [21] e apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Índice K_i para avaliação molecular de solos sedimentares [21].

RELAÇÃO MOLECULAR	LIMITES	GRAU DE INTEMPERIZAÇÃO
$K_i = 1,7x \left(\frac{SiO_2}{Al_2O_3} \right)$	$K_i \leq 2,0$	Muito intemperizado
	$K_i > 2,0$	Pouco intemperizado

2.7 Análise Mineralógica – DRX

A identificação dos minerais componentes da fração fina do solo foi realizada por difratometria de raios-X (DRX) utilizando o método do pó em amostras secas ao ar. Os difratogramas de raios-X foram obtidos sob ângulos de varredura entre 10 e 60°, 2 θ , faca de 3mm, tubo de raios X de cobre, fenda de 3mm, Soler de 2,5 graus. A faixa de varredura foi de 30 kv e 10Am no equipamento Panalytical Empyrean, pertencente ao Laboratório de Materiais do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas.

2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A análise da morfologia microestrutural do argilomineral nas amostras deformadas foi realizada no Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA. As micrografias foram realizadas em um aparelho Tescan Vega 3, utilizando ampliações de 1.000X, 5.000X e 25.000X.

A figura 5 ilustra o equipamento utilizado neste ensaio, bem como outras etapas de caracterização descritas ao longo do item 2.

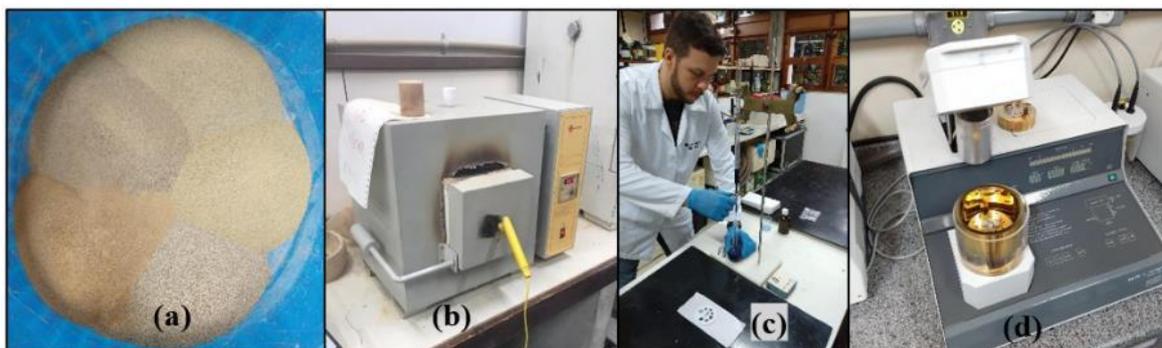


Figura 5: (a) aspecto visual das 05 amostras secas ao ar e destorroadas; (b) aquecimento a 440° em forno mufla para obtenção do teor de matéria orgânica; (c) técnica do azul de metileno para obtenção da Capacidade de Troca Catiônica – CTC; (d) etapa de metalização das amostras 24 horas antes do ensaio MEV.

3. RESULTADOS

Os resultados da caracterização física das amostras estão presentes na Tabela 02. Os resultados da análise química envolvendo o Teor de matéria orgânica, Capacidade de Troca Catiônica e as concentrações de óxidos presentes nas amostras são apresentados na Tabela 03; nas Figuras 6 e 7 são apresentadas as micrografias resultantes da análise microestrutural obtidas no ensaio MEV; e na Figura 08 são apresentados os Difrato-gramas com a indicação dos argilominerais correspondentes aos picos obtidos no ensaio de DRX.

Tabela 2: Caracterização Física das 05 amostras estudadas.

AM	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS - δ [22]	LIMITE DE LIQUIDEZ LL (%) [23]	LIMITE DE PLASTICIDADE LP (%) [24]	ÍNDICE DE PLASTICIDADE IP = LL - LP (%)	PASSANTE #200 (%)	FRAÇÃO ARGILA < 2 μ (%)	ATIVIDADE A=IP/< 2 μ
01	2,75	64,8	35,5	29,3	100,0	50,0	0,58
02	2,71	53,0	25,9	27,1	100,0	37,0	0,73
03	2,73	69,3	28,2	41,1	100,0	62,0	0,66
04	2,71	72,3	33,9	38,4	100,0	33,0	1,16
05	2,73	37,1	22,2	14,9	96,6	59,0	0,24

Tabela 3: Resultados da análise química nas 05 amostras desta pesquisa.

AMOSTRA	TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA (%)	CTC EM Meq/100g (cmolc/dm ³)	ÓXIDOS (%)*						
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	CaO
01	0,81	109,00	60,78	21,36	9,78	2,86	1,73	1,21	1,27
02	1,21	94,00	61,88	21,75	8,63	3,26	1,59	1,23	-
03	2,55	94,00	57,78	22,08	8,43	3,28	1,26	1,16	5,13
04	2,61	108,00	62,01	23,20	8,35	2,88	1,25	1,29	-
05	2,59	109,00	63,28	25,30	5,28	3,43	0,42	1,39	-

*Traços (óxidos < 1,0%): CaO, Na₂O, P₂O₅, SO₃, MnO, Cr₂O₃, ZrO₂, SrO, ZnO, Cl, Rb₂O e CuO.

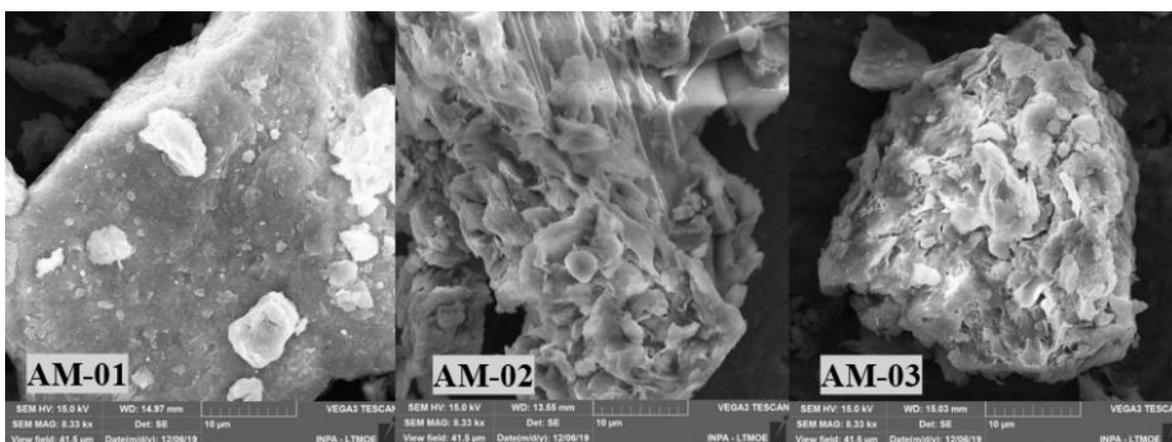


Figura 6: Imagens de microscopia eletrônica por varredura das amostras 01, 02 e 03 ampliadas 8.000X (10 µm).

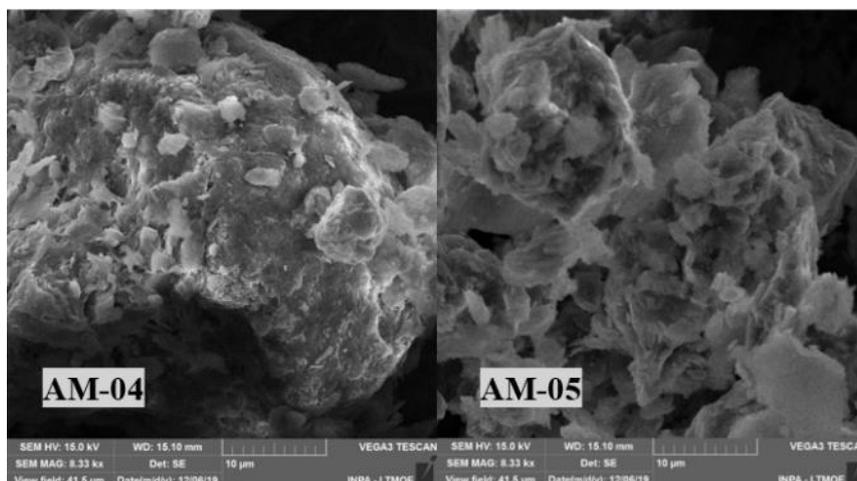
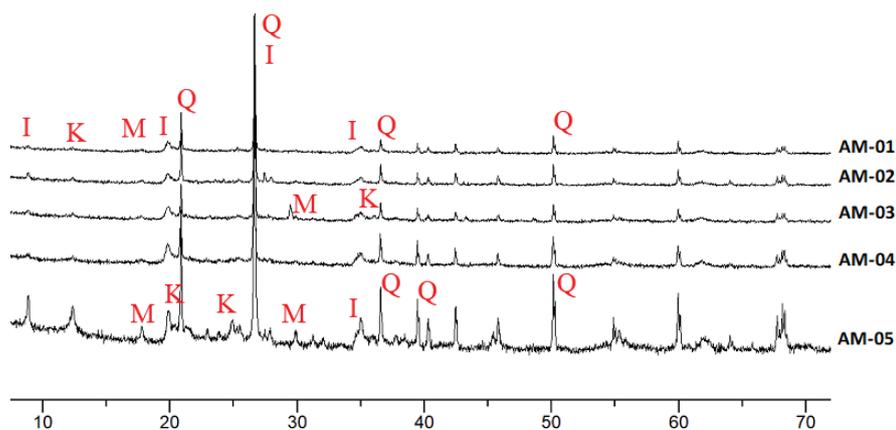


Figura 7: Imagens de microscopia eletrônica por varredura das amostras 04 e 05 ampliadas 8.000X (10 µm).



K=caulinita; I=Ilita; M=Montmorilonita; Q=Quartzo.

Figura 8: Espectros de difração de raios-X das 05 amostras desta pesquisa.

4. DISCUSSÃO

4.1 Avaliação Microestrutural

Do ponto de vista da morfologia do solo, as micrografias das amostras de Rio Branco apresentaram pacotes com um tamanho aproximado entre 20 e 30 μm , com a presença de flocos equidimensionais associados a partículas de estrutura lameladas muito finas, atributos característicos da montmorilonita, conforme descrito por MITCHELL e SOGA [20].

4.2 Avaliação dos indicadores físicos no potencial expansivo do solo

As características físicas das amostras listadas na Tabela 01 indicam ligeira similaridade, com solos muito plásticos e finos, cujas partículas passam totalmente na peneira n° 200 (0,075 mm). Os valores de Limite de Liquidez (LL) observados nas amostras de 01 a 04, variando de 53% a 72%, representam a elevada capacidade de retenção de água do solo, indicando a presença de argilominerais expansivos.

Uma das formas de avaliar indiretamente a classificação dos solos expansivos é a carta de VAN DER MERWE [25] na Fig. 09, a qual relaciona o Índice de plasticidade do solo com o Teor de argila. Com base nos resultados, notou-se que as amostras 01 a 04 variaram entre grau de expansão alto a muito alto. Apenas a amostra 05 foi classificada como baixo grau de expansão, a despeito do comportamento observado em campo nos locais da coleta.

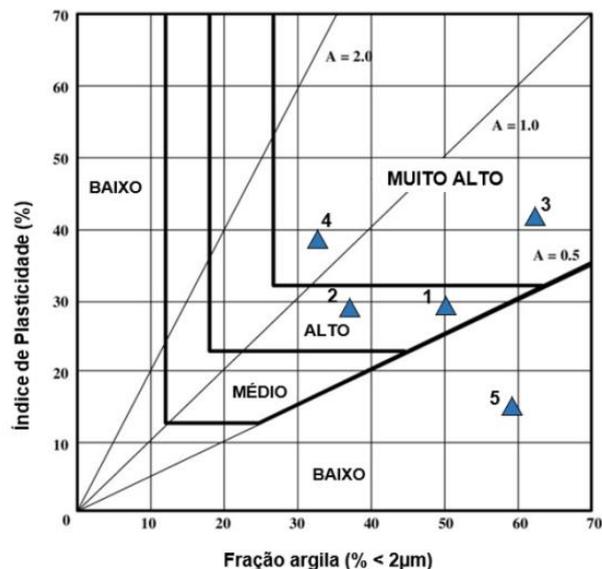


Figura 9: Carta de VAN DER MERWE [25] para avaliação da expansividade do solo.

4.3 Avaliação dos aspectos químicos e mineralógicos no potencial expansivo do solo

Os picos do ensaio de difração de raios-X apresentados na Figura 8 refletiram principalmente os argilominerais illita, montmorilonita, caulinita e quartzo. Verificou-se bastante similaridade entre as amostras, ocorrendo uma maior variação de picos na amostra 05, a qual apresentou picos mais intensos de caulinita e illita. Além desses argilominerais, observou-se em todas as amostras a presença da montmorilonita. A montmorilonita, principal argilomineral do grupo das esmectitas, é um filossilicato do tipo 2:1 muito comum em depósitos sedimentares, caracterizando-se pela elevada capacidade de troca catiônica e adsorção de água entre suas camadas estruturais, contribuindo significativamente com o comportamento expansivo do solo em campo.

Os teores de matéria orgânica variaram entre 0,81% (amostra 01) e 2,61% (amostra 04), o que não representa uma faixa de valores significativos segundo a EMBRAPA [27], a qual considera solos ricos em matéria orgânica somente aqueles com teores maiores que 5,0%. Apesar disso, vale destacar que segundo a NLA - National Lime Association [28], teores acima de 1% não são recomendados para processos de estabilização química, inviabilizando uma das alternativas comumente adotadas para solos expansivos.

Com base nos resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno, observou-se que os valores de CTC foram bastante elevados e próximos entre si, variando entre 94 e 109 meq/100g. Esses valores represen-

tam o número de cátions necessários para balancear as cargas negativas na superfície do argilomineral, o que indica a presença de argilas de alta atividade. Um ponto a se destacar é que apenas a amostra 05 (Aeroporto) apresentou uma aura bem definida no ponto de viragem (Fig. 4), enquanto as outras amostras foram definidas em função da mudança brusca na coloração.

A Capacidade de Troca de cátions pode ser relacionada ao argilomineral presente na estrutura da argila conforme as faixas da Tabela 4, adaptadas de SANTOS [29]. Nota-se uma maior correspondência com a esmectita, confirmando o elevado potencial expansivo das amostras.

Tabela 4: Provável argilomineral em função do CTC, adaptado de SANTOS [29].

ARGILOMINERAL	CTC (MEQ/100G)
Caulinita	3 a 15
Ilita	10 a 40
Esmectita	80 a 150

Uma correlação combinando índices tradicionais da Engenharia com características químicas do solo é a desenvolvida por Hamberg (1985), conforme apresentado em NELSON *et al.* [18], a qual correlaciona a atividade de troca catiônica (CTC / Fração argila) com a atividade do solo. A carta foi desenvolvida com base em ensaios de expansão do tipo “COLE” em solos da Califórnia, nos Estados Unidos. Na Figura 10 são apresentados os potenciais de expansão para as amostras deste trabalho.

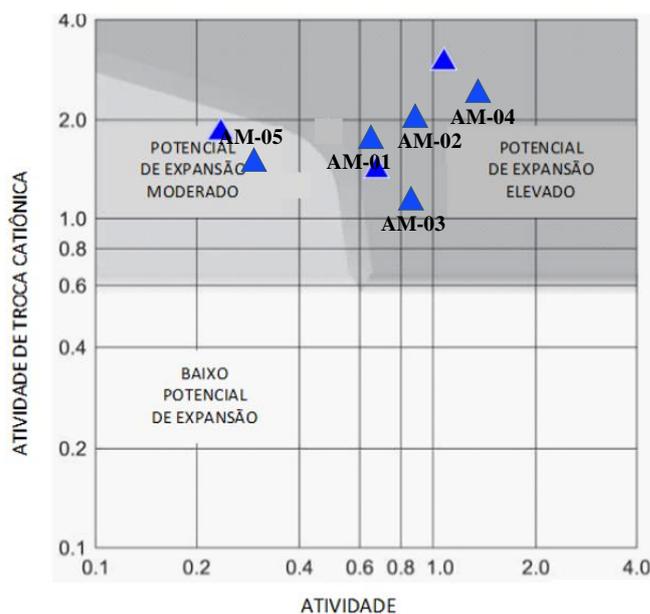


Figura 10: Potencial de expansão relacionando a Atividade do Solo e a Atividade de Troca Catiônica.

Nota-se que, utilizando as características químicas e mineralógicas combinadas com os índices físicos, as amostras foram classificadas ou como de elevado potencial expansivo (Amostras 01 a 04), ou de expansão moderada (Amostra 05), o que representa mais fielmente os impactos nas obras observados em campo.

A relação molecular, expressa pelo índice de intemperismo K_i , apresentou em todas as amostras valores acima de 2,0, variando entre 4,3 (Amostra 05) e 4,8 (Amostra 01), o que as caracteriza como pouco intemperizadas, evidenciando se tratar de solos não-lateríticos e, portanto, com menor capacidade de suporte para obras de infraestrutura rodoviária. Essa diferenciação se torna ainda mais relevante no contexto nacional, na medida em que classificações tradicionais, geralmente pautadas na granulometria, não traduzem o melhor comportamento mecânico para solos de regiões tropicais.

5. CONCLUSÕES

Os ensaios e as metodologias descritas neste trabalho identificaram a presença de solos de elevada expansividade nas amostras avaliadas. A carta de expansão de VAN DER MERWE [25], baseada nos índices físicos, não se mostrou adequada para avaliar a expansividade dos solos, provavelmente em função da granulometria muito fina das amostras desta pesquisa. Por outro lado, combinando indicadores físicos a características químicas e mineralógicas do solo mediante o uso da carta de Hamberg, apresentada em NELSON *et al.* [18], confirmou-se o potencial de expansão de moderado a elevado nas amostras, representando de forma mais precisa os defeitos no pavimento e os demais danos visualizados em campo.

Observou-se ainda que todas as amostras coletadas apresentaram ligeira similaridade, tanto nos aspectos macroestruturais como dentre as características avaliadas nos ensaios desta pesquisa, mesmo com diferenças de até 30 km entre os locais de coleta. Contudo, faz-se necessário um estudo mais abrangente que tenha por objetivo correlacionar uma maior quantidade de amostras, fornecendo ao meio técnico importantes parâmetros para um dimensionamento mais eficaz de obras rodoviárias na região.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio dos Professores e Técnicos que contribuíram com essa Pesquisa dos laboratórios a seguir listados: Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas; Laboratório de Materiais/ICE/UFAM; Laboratório de Geoquímica/ICE - Instituto de Ciências Exatas/UFAM; Laboratório Temático de Microscopia do INPA - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia; Laboratório Crowfoot de Métodos de Raios-X da Universidade do Estado do Amazonas e Laboratório de Solos da Universidade Federal do Acre (UFAC).

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] FERREIRA, S.R.M., PAIVA, S.C., MORAIS, J.J.O., *et al.* Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. Revista Matéria, v. 22, supl. 1, Rio de Janeiro, 2017.
- [2] FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H., FREDLUND, M.D., Unsaturated soil mechanics in engineering practice, 1 ed., Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [3] TERZAGUHI, K., PECK, R.B., MERS., Soil Mechanics in Engineering Practice., 3 ed., New York, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [4] NELSON, J.D., MILLER, D.J., Expansive Soils, Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering., New York, John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [5] FERREIRA, S.R.M., “Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil”, In: VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v. 2., UFBA, Salvador, Bahia, pp. 593-612, 2007.
- [6] PAIVA, S.C., LIMA, M.A.A., FERREIRA, M.G.V.X., *et al.* Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. Revista Matéria, v. 21, n. 2, Rio de Janeiro, 2016.
- [7] BARBOSA, V.H.R., MARQUES, M.E.S., GUIMARÃES, A.C.R., Caracterização mineralógica de um solo do Acre visando à produção de agregados artificiais de Argila Calcinada para uso em pavimentos. Revista Matéria, v. 23, n. 3, Rio de Janeiro, 2018.
- [8] SEIXAS, S., “Comportamento dinâmico dos materiais componentes do Pavimento da Pista de Pouso do Novo Aeroporto de Rio Branco”, Dissertação de Mestrado, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.
- [9] CÓRDOVA, H.G., “Estudo e Avaliação da Estrutura do Pavimento da Pista de Pouso e Decolagem do Aeroporto de Rio Branco/AC”, Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- [10] OLIVEIRA, M.A., FERREIRA, A.L., “Avaliação Geológico-Geotécnica da cidade de Rio Branco – Acre”, In: Relatório Final, Ministério de Minas e Energia, Manaus, AM, 2006.
- [11] SINAPI, CAIXA, <http://www.caixa.gov.br>, acessado em maio de 2020.
- [12] ZHANG, J. *et al.*, “Prediction of climate specific vertical movement of pavements with expansive soils based on long-term 2D numerical simulation of rainwater infiltration”, Computers and Geotechnics, v. 115, 2019.
- [13] RODRIGUES, T.E., GAMA, J.R.N.F., “Plantissolos Argilúvicos com argila de atividade alta no estado do Acre”, Embrapa Amazônia Oriental, v. 66, Belém, Pará, 2003.
- [14] HID, A.R., “Monitoramento da Expansão Urbana e Ocupação Predial Às Margens Do Igarapé São Francisco Em Rio Branco – Acre”, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2000.
- [15] BARDALES, N.G., *et al.*, “Formação, Classificação e Distribuição Geográfica dos Solos do Acre”, In:

Livro temático II: Recursos Naturais I Geologia, Geomorfologia e Solos do Acre, Programa Estadual de Zoneamento ecológico econômico do Acre Fase II Escala 1:250.000, SEMA, Rio Branco, Acre, 2010.

[16] AMARAL, E.F., “Estratificação de ambientes para gestão ambiental e transferência de conhecimento, no Estado do Acre, Amazônia Ocidental”, Tese de Doutorado, Universidade de Viçosa, Minas Gerais, 2007.

[17] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996, NBR 13600, Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C, Rio de Janeiro.

[18] NELSON, J.D., CHAO, K.C. *et al.*, *Foundation Engineering for Expansive Soils, Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering.*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2015.

[19] TOPAL, T. “The use of methylene blue adsorption test to assess the clay content of the Cappadocian tuff”, *Geological Engineering Department, Middle East Technical University*, pp. 791-799, Ankara, Turkey.

[20] MITCHELL, J.K., SOGA, K., *Fundamentals of Soil Behavior*, 3 ed, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2005.

[21] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2005, *Manual Técnico de Pedologia, Manuais Técnicos em Geociências*, Rio de Janeiro, 2 ed., n.4, 316 p. Brasil.

[22] DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, DNER-ME 093/94, Solos - Determinação da densidade real. Brasil.

[23] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984, NBR 6459, Solo – Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, RJ.

[24] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984, NBR 7180, Solo – Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, RJ.

[25] MERWE, D.H.V., “The Prediction of Heave from the Plasticity index and percentage clay fraction of soils”, *The British Journal of Psychiatry*, v. 111, n. 479, p. 1009-1010, 1965.

[26] FABBRI, G. T. P., “Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno”, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, p. 176, 1994, São Carlos, SP.

[27] EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, *Manual de Métodos de Análise de Solo*, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 577 p., Brasília, DF, 2017.

[28] NLA - NATIONAL LIME ASSOCIATION, *Lime-Treated Soil Construction Manual, Lime Stabilization & Lime Modification*, ed. 3, bulletin 326, Virginia, USA, 2004.

[29] SANTOS, P.S., *Tecnologia das argilas- Vol 2, Fundamentos*. São Paulo. Ed. Edgard Blucher, 1975.

ORCID

Victor Hugo Rodrigues Barbosa

<https://orcid.org/0000-0002-9476-7995>

Maria Esther Soares Marques

<https://orcid.org/0000-0001-8936-2777>

Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

<https://orcid.org/0000-0001-9244-7034>

Marcos Valério Mendonça Baia

<https://orcid.org/0000-0002-1996-2053>

Daniel Jardim Almeida

<https://orcid.org/0000-0002-8886-3606>