

Solos Expansivos do Acre: Identificação e Caracterização para o dimensionamento de um pavimento na BR-364

Victor Hugo Rodrigues Barbosa
Doutorando, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, victorhrb@gmail.com

Maria Esther Soares Marques
Professora Titular, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, esther@ime.eb.br

Antônio Carlos Rodrigues Guimarães
Professor Titular, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, guimaraes@ime.eb.br

Daniel Jardim Almeida
Doutorando, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, danieljardomalmeida@gmail.com.br

Marcos Valério Mendonça Baia
Mestre, Universidade Federal do Amazonas, Amazonas, Brasil, engbaia@gmail.com

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 apresenta um estudo de caso de um pavimento construído sobre um subleito expansivo na cidade de Rio Branco. São realizados ensaios de caracterização física e de absorção de azul de metileno em amostras deformadas; e compressão edométrica pelo método do volume constante em amostras indeformadas. Os resultados mostram o alto potencial de expansão das amostras e a importância do uso de uma abordagem simples para estimar a movimentação vertical em solos expansivos.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Expansivos, Amazônia, Pavimentos Flexíveis.

ABSTRACT: The main geotechnical aspects of the southwestern Brazilian Amazon are the absence of rocks for the gravel used in pavements and the widespread occurrence of expansive soils along the natural subgrade, associated with high rainfall indices. The high volumetric variation of these expansive soils has been causing financial losses and making transportation by land difficult in the region. Although most of the local soils are rich in 2:1 clay minerals, the state-of-art on how the behavior of these materials influences local pavements is still very limited. This paper presents the case study of a pavement built over expansive subgrade at Rio Branco city. Physical and chemical characterizations of disturbed and undisturbed samples are presented. The results showed the high swelling potential of the samples and the importance of using a simple approach for predicting vertical movements of expansive soils.

KEYWORDS: Expansive Soils, Amazon, Flexible Pavements.

1 Introdução

Solos expansivos são tipos específicos de solos argilosos não saturados que, quando submetidos a mudanças de umidade ou sucção, apresentam elevada variação volumétrica, gerando deslocamentos de massa que podem ocasionar danos em estruturas leves como pequenas edificações e pavimentos, demandando reparos constantes ou mesmo a reconstrução de toda a estrutura.

A expansão de um material é um fenômeno complexo dominado por causas físico-químicas, normalmente associada à presença de argilominerais com estrutura laminar do tipo 2:1, a exemplo das esmectitas. Solos com essas características são muito suscetíveis a variações sazonais de umidade ou sucção, ocorrendo aumento de volume por umedecimento e redução por secagem, o que se repete de forma cíclica (Vilar et al., 2015).

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 (Ferreira, 2006). No estado do Acre, apesar do clima quente e úmido, há diversos registros que apontam a ocorrência generalizada de solos expansivos, inclusive na capital Rio Branco.

Em Rio Branco, grande parte dos solos 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 (Oliveira et al., 2006). Historicamente, tais características resultaram em diversos problemas práticos de Engenharia, a exemplo das obras do Aeroporto da capital (Córdova, 2011; Seixas, 1997), e os constantes serviços de reconstrução da rodovia BR-364 citados em Barbosa (2017).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento de amostras deformadas e indeformadas de solos potencialmente expansivos na cidade de Rio Branco sob uma perspectiva geotécnica, classificando e correlacionando suas características físico-químicas com a literatura de referência, bem como aplicar um método simples de previsão da tensão de expansão e movimentação vertical das camadas de um pavimento teórico em diferentes situações.

2 Metodologia

2.1 Local do estudo

Localizada na Amazônia Oriental, na porção leste do estado do Acre, o local de estudo está localizado no Município de Rio Branco (Fig. 01), próximo à rodovia BR-364. De acordo com a classificação de Köppen, predomina na região o clima AW, que corresponde a climas úmidos tropicais (Rodrigues et al., 2003). A temperatura média anual é de aproximadamente 24 °C, enquanto a precipitação média anual varia em torno de 1.700 a 2.400 mm. Geologicamente, o substrato da região é constituído em grande medida por um pacote espesso de sedimentos argilosos, altamente plásticos e com espessuras variando entre 5 a 16 m, onde ocorre uma predominância de argilominerais do tipo 2:1 (Oliveira et al., 2006).

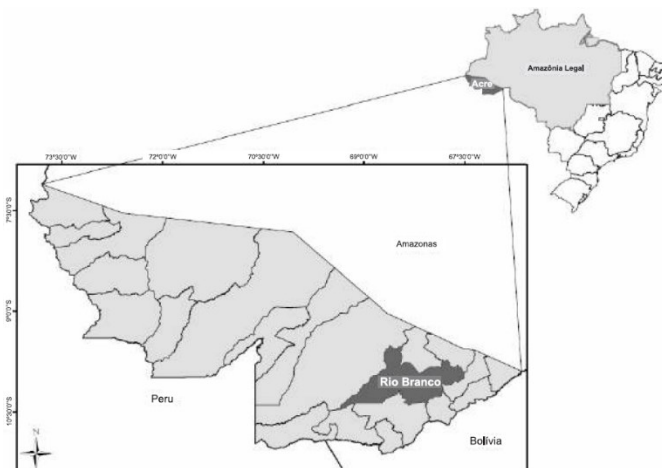


Figura 1. Localização do Município de Rio Branco (Lani et al., 2008)

Além das condições intrínsecas do material que o constituem, os solos de Rio Branco apresentam suficientes indícios que as variações volumétricas registradas nas obras de engenharia estão fortemente

correlacionadas às condições ambientais. O estado do Acre 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.

Do ponto de vista construtivo, soluções tradicionais em Engenharia para Pavimentos construídos sobre depósitos de solos expansivos envolve o uso abundante de agregados pétreos 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, chegando a custar até 4 vezes mais que alguns estados, tornando muito comum a utilização de solos lateríticos para essa função (Barbosa, 2017). Nessa perspectiva, além de dimensionar as camadas do pavimento para resistir às cargas cíclicas do tráfego, é fundamental conhecer as características expansivas do subleito com o propósito de estimar as espessuras de remoção, substituição ou acréscimo de solos inertes para reforço.

2.1.1 Coleta das amostras

As amostras utilizadas nesta pesquisa foram coletadas em um loteamento residencial nas margens da rodovia BR-364, em cuja rede viária foram observadas trincas longitudinais após o início do período chuvoso e anteriores à liberação do tráfego (Fig. 02a). Foram coletadas 03 amostras deformadas para os ensaios de caracterização físico-química e 03 amostras indeformadas para ensaios de compressão edométrica, todas a uma profundidade média de 1,0 metro. O perfil típico dos locais coletados é mostrado na Figura 02b.

Nas margens da via, observou-se ainda no terreno natural a ocorrência generalizada de trincas em um padrão poligonal, com aproximadamente 2,5 cm de espessura (Fig. 02c). 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.



Figura 2. (a) Trincas Longas Longitudinais no Pavimento após a construção; (b) Perfil típico do solo coletado; (c) Ocorrência generalizada de trincas de retração na superfície durante o período seco.

2.2 Caracterização Físico-Química

A determinação dos parâmetros físicos do solo foi realizada no Laboratório de Solos da Universidade Federal do Acre (UFAC) por meio dos ensaios de Granulometria por Sedimentação, Densidade Real e Limites de Atterberg nas 03 amostras coletadas.

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.

2.2 Análise de Tensões no Perfil

Com o intuito de estimar futuras movimentações verticais nos pavimentos devido à variação de umidade ou sucção no perfil, Foram realizados ensaios edométricos no Laboratório de Solos da Universidade Federal do Acre (UFAC) em 03 amostras indeformadas, cada qual medindo 10 cm de diâmetro por 03 cm de altura.

Foi utilizado o Método do Volume Constante, conforme indicado em Fredlund et al. (1996), o qual envolve a inundação total da amostra sujeita a uma carga de ajuste inicial de 7 kPa. Na medida em que a amostra tende a expandir, o operador gera um incremento de carga, mantendo o volume constante até que não exista mais tendência à variação volumétrica da amostra. Este ponto corresponde à Tensão de Expansão (P_s). A partir desse ponto prossegue-se com a sequência de carregamento e descarregamento da maneira convencional.

A análise gráfica seguinte permite a obtenção de duas outras medidas: a Tensão de expansão corrigida pelo método Casagrande (P'_s), que considera a tensão de pré-adensamento; e o coeficiente de expansão (C_s), parâmetro obtido pela inclinação da curva de descompressão, conforme Figura 03.

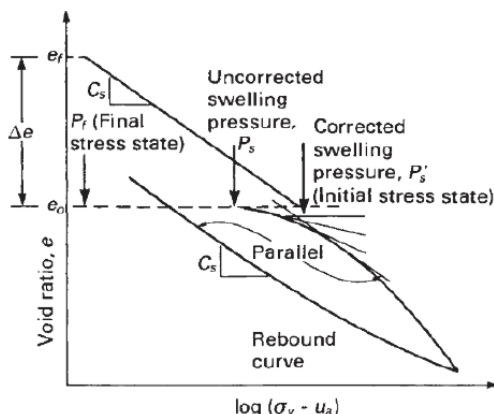


Figura 3. (a) Modelo de resultado de Ensaio Edométrico pelo Método do Volume Constante considerando a correção do amolgamento da amostra (Fredlund, 2012).

A equação 01 proposta por Fredlund et al. (1983) fornece a expansão vertical em 1 dimensão (*I-D heave*) para a modelagem utilizada neste trabalho, a qual considera a expansão máxima quando o solo adquire a condição saturada, condição favorecida na prática regional pelo elevado nível do lençol freático ou pela percolação da água da chuva pelas trincas superficiais.

$$\Delta H = C_s \frac{H}{1 + e_0} \log \left\{ \frac{P_f}{P'_s} \right\} \quad (1)$$

Onde H = espessura da camada, P_f = Tensão efetiva; P'_s = Tensão de expansão corrigida; C_s = Coeficiente de expansão e e_0 = índice de vazios inicial do solo.

Neste trabalho considerou-se uma camada de 2 metros de solo expansivo, a qual foi dividida em três camadas homogêneas com 20%, 30% e 50% da espessura total, conforme sugerido por Fredlund et al. (1996), onde cada subcamada foi calculada pela equação 01. Finalmente, a expansão total do perfil, ΔH , é igual à somatória de todas as subcamadas, conforme a Equação 02. Tal procedimento se faz necessário pelo fato da expansão não ser linear, sendo mais significativa próxima à superfície.

$$\Delta H = \sum \Delta h_i \quad (2)$$

Foram consideradas duas situações: na primeira, avaliou-se a expansão resultante no perfil natural sem qualquer interferência; na segunda, considerou-se a substituição de 1,0 m de solo expansivo pela mesma espessura de um solo laterítico (inerte) com peso específico de 18,0 kN/m³, o que corresponde a uma estrutura típica para pavimentos na região. Considerou-se ainda que não houve atraso relevante no processo de troca de solos, o que evita a perda de umidade durante esse processo.

3 Resultados e Discussão

3.1 Resultados

Os resultados dos ensaios de caracterização física e de Capacidade de Troca Catiônica pelo método da mancha são apresentados na Tabela 01. A Tabela 02 apresenta as características geotécnicas das amostras indeformadas e os parâmetros obtidos das curvas de adensamento dos ensaios edométricos.

Tabela 1. Resultados da Análise Físico-Química nas 03 amostras desta pesquisa.

Amostra	Densidade Real dos Grãos - δ (DNER-ME 93/94)	Limite de Liquidez (%) (NBR 6459)	Limite de Plasticidade (%) (NBR 7180)	Índice de Plasticidade (%)	Passante #200 (%)	Fração Argila < 2 μ m (%)	CTC em Meq/100g (cmolc/dm ³)
AM-01	2,75	64,8	35,5	29,3	100,0	57,0	109,0
AM-02	2,71	53,0	25,9	27,1	100,0	67,0	94,6
AM-03	2,73	69,3	28,2	41,1	100,0	62,0	94,0

Tabela 2. Resultados dos parâmetros geotécnicos obtidos nas amostras indeformadas.

Amostra	Peso específico aparente seco γ_d (g/cm ³)	Peso específico γ (g/cm ³)	Índice de vazios (e)	Umidade natural (%)	Coefficiente de expansão C_s	Tensão de expansão P_s (kPa)	Tensão de expansão corrigida P'_s (kPa)
AM-01	1,56	1,97	0,75	25,6	0,037	17	26
AM-02	1,48	1,92	0,88	29,5	0,053	50	138
AM-03	1,72	2,01	0,58	16,7	0,025	63	90

3.2 Discussão

3.2.1 Classificação do Potencial expansivo das amostras

Uma das formas de avaliar indiretamente a classificação dos solos expansivos é a carta de Van der Merwe (1964) na Fig. 04, a qual relaciona o Índice de plasticidade do solo com o Teor de argila. Com base nos resultados, notou-se que 02 amostras foram inseridas na zona menos expansiva, o que não corresponde ao comportamento presenciado em campo. Conforme apontado por Fabbri (1994), uma provável causa é o fato de que os ensaios de Limite de Liquidez e de Plasticidade são realizados com a fração que passa na peneira # 0,42 mm, a qual apresenta frequentemente muito material inerte, o que faz com que os resultados em muitos casos não representem de forma adequada os solos com excesso de finos de alta atividade.

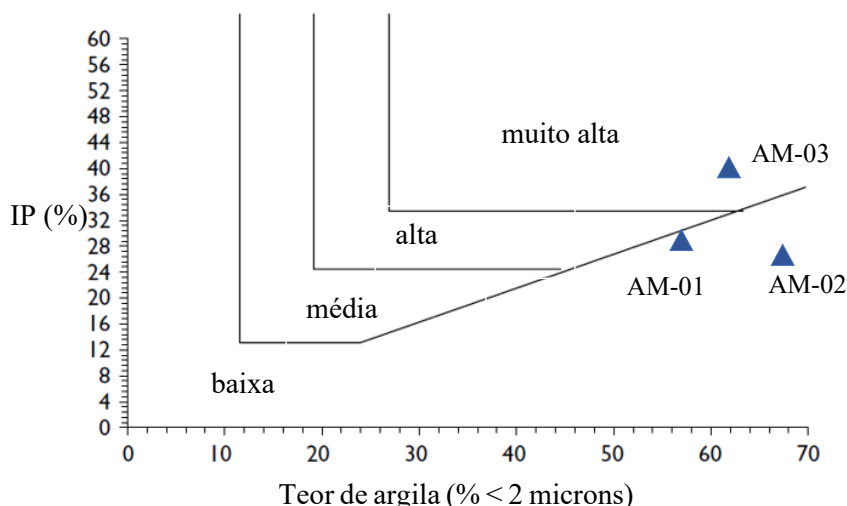


Figura 4. Carta de Van Der Merwe (1964) para avaliação da expansividade do solo.

Os resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno mostraram valores próximos e bastante elevados de CTC, variando entre 94 e 109 meq/100g. Esses valores representam o número de cátions necessários para balancear as cargas negativas na superfície do argilomineral, o que indica a presença de argilas de alta atividade.

A Capacidade de Troca de cátions pode ser relacionada ao argilomineral presente na estrutura da argila conforme as faixas da tabela 03, adaptadas de Santos (1975). Nota-se uma maior correspondência com a esmectita, confirmando o elevado potencial expansivo das amostras e contrariando a análise baseada nos índices físicos apresentada na Figura 04.

Tabela 3. Resultados dos parâmetros geotécnicos obtidos nas amostras indeformadas.

Argilomineral	CTC (meq/100g)
Caulinita	3 a 15
Ilita	10 a 40
Esmectita	80 a 150

3.2.2 Expansão Vertical do subleito

Tendo em vista procedimento de correção do amolgamento das amostras proposto por Casagrande, cujos resultados são apresentados na Tabela 02, verifica-se que as tensões de expansão corrigidas apresentam valores 1,5 a 2,0 vezes maiores, reforçando a importância dessa correção.

Com base nos resultados do item 3.1, avaliou-se a expansão vertical no perfil para as duas situações propostas em 2.2, aplicando as equações e a subdivisão das camadas apresentadas no mesmo item. Foram obtidos os valores de expansão prevista em cada subcamada e suas somatórias, conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Expansão vertical para as amostras analisadas com e sem mudança da Tensão Total no perfil.

Amostra	Espessura da subcamada (mm)	Expansão Vertical estimada sem troca de solos ΔH (mm) Equações 1 e 2	Espessura da subcamada (mm)	Expansão Vertical estimada com troca de solos (substituição de 1m) ΔH (mm) Equações 1 e 2
AM-01	400	6,9	200	0,5
	600	3,5	300	0,1
	1000	1,2	500	1,1
	$\Sigma \Delta H$	11,6	$\Sigma \Delta H$	1,7
AM-02	400	17,5	200	4,7
	600	17,1	300	6,3
	1000	19,2	500	8,9
	$\Sigma \Delta H$	53,8	$\Sigma \Delta H$	19,9
AM-03	400	8,5	200	2,1
	600	7,5	300	2,6
	1000	7,7	500	3,4
	$\Sigma \Delta H$	23,7	$\Sigma \Delta H$	8,1

Com base nos cálculos apresentados na Tabela 4, nota-se que entre 32% e 59% da expansão ocorre já no primeiro quarto do perfil de solo expansivo. Reduzindo-se a camada expansiva para 1,0 metro e aplicando uma sobrecarga de 18 kPa com material inerte, têm-se uma redução da expansão do primeiro quarto para valores entre 23% e 29% de toda a camada.

No geral, exceto pela amostra 01, os valores de expansão obtidos com ou sem troca de solo podem ser considerados potencialmente danosos para diversos tipos de estruturas leves, especialmente os pavimentos existentes nas adjacências da BR-364. Isso se agrava na medida em que as tensões verticais nas estruturas geralmente ocorrem de maneira desigual, concentrando-se mais nas bordas e menos na zona central.

4 Conclusões

Os ensaios e os procedimentos de cálculo descritos neste trabalho identificaram a presença de solos de elevada expansividade nas amostras coletadas em Rio Branco, confirmando, em uma primeira análise, os defeitos no pavimento e demais observações de danos visualizadas em campo. O ensaio de absorção de azul de metileno pelo Método da mancha complementou a análise pela carta de Van der Merwe, a qual isoladamente não conseguiu prever o comportamento expansivo em todas as amostras.

Os ensaios edométricos pelo Método do volume constante forneceram importantes parâmetros, permitindo a aplicação de um método simples para a previsão da expansão vertical em campo quando a umidade do solo atinge a condição saturada.

As magnitudes das expansões calculadas do subleito apresentaram potencial danoso para estruturas típicas de pavimentos flexíveis em 2/3 das amostras, o que demonstra a necessidade da adoção de medidas mitigadoras, tais como estabilizações, aumento da sobrecarga de confinamento, barreiras de umidade verticais e/ou horizontais etc.

Contudo, vale ressaltar que uma compreensão mais precisa do comportamento desse tipo de estrutura ao longo da vida útil de um projeto viário poderá demandar abordagens com menos simplificações, as quais considerem os efeitos do tráfego, clima, módulo resiliente, dentre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lani, J. L.; Amaral, E. F.; Bardales, N. G.; Araújo, E. A. (2008). Diagnóstico dos tipos de solos do Município de Rio Branco-AC. Boletim Técnico n.º 001. Secretaria Executiva do Programa de Zoneamento Econômico, Ambiental, Social e Cultural de Rio Branco-AC - ZEAS. Rio Branco, Acre, 62 p.
- Barbosa, V. H. R. (2017). *Estudo de solos do Acre para a produção de agregados calcinados e misturas para bases em Pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ. 156 p.
- Vilar, O. M.; Ferreira, S. R. M. (2015). *Solos colapsíveis e expansivos*. In: Carvalho, J. C. et al. (Org.). Solos Não Saturados no contexto geotécnico. São Paulo: ABMS, 2015. cap. 15. p. 415-441.
- Fabrizi, G. T. P. (1994). *Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 176 p.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H.; Fredlund, M. D. (2012) *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons. 926 p.
- Fredlund, D. G.; Ahmad, N.; Mermut, A. (1996). *Geotechnical problems associated with swelling clays. Vertisols and technologies for their management*. p. 499–524.
- Córdova, H. G. (2011). *Estudo e Avaliação da Estrutura do Pavimento da Pista de Pouso e Decolagem do Aeroporto de Rio Branco/AC*. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ. 181 p.
- Ferreira, S. R. M. (2006). *Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil*. In: Machado, S. L.; Carvalho, M. F. Anais do VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados - volume 2. UFBA: Salvador. p. 593-618.
- Oliveira, M. A.; Ferreira, A. L. (2006). *Avaliação Geológico-Geotécnica da Cidade de Rio Branco - Acre*. Relatório Final. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Manaus-AM. 53 p.
- Rodrigues, T. E.; Gama, N.; Silva, J. M. L.; Veloso, A. C.; Sena, W. L. (2003). *Plintossolos Argilúvocos com argila de atividade alta no estado do Acre*. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. UNESP, Ribeirão Preto, São Paulo.
- Santos, P. S. (1975). *Tecnologia das argilas – Vol 2. Fundamentos*. São Paulo. Ed. Edgard Blucher, 1975.
- Seixas, S. (1997). *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. 237 p.
- Van der Merwe, D. H. (1964). *Prediction of Heave from the Plasticity Index and Percentage of Clay Fraction of Soils*. Civil Engineering = Siviele Ingenieurswese, Volume 6, Issue 6, p. 103 - 107.
- Yoshida, R. T.; Fredlund, D. G.; Hamilton, J. J. (1983). *The prediction of total heave of a slab-on-ground floor on Regina clay*. Canadian Geotechnical Journal, v. 20, n. 1, p. 69–81.