

AVALIAÇÃO DA PRESSÃO DE EXPANSÃO DE SOLOS DA RODOVIA BR-324 TRATADOS QUIMICAMENTE

Oskar Pinto Oliveira ¹

Antonio Felipe de Souza Machado Reis ²

Italo Santos da Silva ³

Miriam de Fátima Carvalho ⁴

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as características e o potencial de expansão de solos de massapê da BR-324, através de ensaios de expansão realizados em condições naturais e tratadas quimicamente sob diferentes metodologias de saturação (na prensa de adensamento e infiltração prévia nas amostras indeformadas) e diferentes dosagens de líquidos estabilizantes. Os solos estudados apresentaram em sua composição mais de 80% de finos, índice de plasticidade maior que 20% e atividade maior que 0,50. Encontrou-se pressões de expansão de 3,2 a 1.909 KPa para os solos estudados em seu estado natural. Os menores valores de pressão de expansão foram obtidos de ensaios realizados com 0,1% de estabilizante Homy solo mais 1% cal em relação à massa de solo (KM 554) e com saturação na prensa, onde se obtiveram pressões de expansão de 6 e 12 KPa para valores de umidades de 45 % e 43%, respectivamente. Obteve-se pressão de expansão de 75 KPa para a umidade de 11% quando da infiltração prévia da amostra (KM 561) com solução de 5% de Homy solo e 3% de cal em relação massa seca. Apesar da grande dificuldade de infiltração do Homy solo e cal, os tratamentos parecem promissores na redução da expansão das amostras.

Palavras-chave: Massapê. Solos expansivos. Tratamentos químicos.

1 INTRODUÇÃO

Grande parte das construções é executada sobre solos não saturados. Muitas vezes esses solos podem ter natureza expansiva, ou seja, solos que aumentam de volume quando ocorre variação de sua umidade e no seu grau de saturação, ocasionando perda de sua resistência e consequentemente problemas nas estruturas devido ao fenômeno da expansão e retração do solo. Para Chagas *et. al* (2006), esses solos são normalmente originados de rochas sedimentares, como folhelhos e calcários ou de rochas ígneas, como diabásio e basaltos. Tendo como principal argilomineral em sua composição a montmorilonita.

O fenômeno de variação volumétrica de solos causa constante preocupação entre os

¹ Engenheiro Civil, UCSal, oskaroliveira19@gmail.com.

² Graduando em Engenharia Civil, UCSal, felipe.m.reis2@gmail.com.

³ Graduando em Engenharia Civil, UCSal, italosantossilva@hotmail.com.

⁴ Prof. Dra^a em Geotecnia, UCSal, miriam.machado@pro.ucsul.br.

profissionais que trabalham com obras geotécnicas, devido à complexidade do comportamento deste material quando em presença de água e devido a grande dificuldade de implantação e manutenção de obras executadas sobre solos de comportamento expansivo. Segundo Chen (1988), até o final da década de 1930 nem os geotécnicos perceberam o problema dos solos expansivos, mas com o passar dos anos foi surgindo o interesse em resolvê-lo devido aos grandes custos gerados por problemas decorrentes da expansão nas infraestruturas das obras. Os custos associados ao comportamento deste solo são estimados em vários bilhões, anualmente (Jones e Holtz 1973). Chegando a atingir o dobro dos custos causados por enchentes e outras catástrofes naturais.

Solos desta natureza são encontrados em Países, como México, Turquia, Estados Unidos, Argentina, China e África do Sul. No Brasil, são encontrados em várias regiões, como nos estados do Paraná, São Paulo, Santa Catarina; na região nordeste e no norte da Bahia passando por Pernambuco até atingir o Ceará. Na BR- 324, trecho entre Feira de Santana e Salvador, na região do recôncavo baiano, principal corredor de transportes de insumos e passageiros da capital do estado, ocorre a presença de solo tipicamente expansivo, conhecido regionalmente como massapê. Nesses trechos, o pavimento da BR é constantemente afetado por trincas e fissuras decorrentes ao processo de expansão e atividade do solo.

Em função dos grandes problemas, como instabilidade em taludes, subleito de rodovias, fundações de grandes estruturas, desabamento de túneis, dentre outros problemas decorrentes do fenômeno de expansão algumas medidas de prevenção podem ser tomadas, como isolar as fundações das estruturas dos materiais expansivos ou desenvolver projetos com estruturas mais resistentes para que venham resistir às tensões e deformações que o solo impõe.

Embora a solução mais usual e conhecida no campo da engenharia é a substituição do solo expansivo por outro com maior estabilidade, esta alternativa se torna muitas vezes inviável devido ao alto custo, gerado pelo transporte do material retirado e além do impacto ambiental causado pelo descarrego do material. Diante disso, o processo de estabilização de solos tem grande importância, pois permite a correção das características geotécnicas do solo permitindo a utilização do solo local para a execução das obras.

Há vários trabalhos realizados em laboratórios por estudiosos como: Ferreira et al (2017), Paiva et al (2016) e Barbosa (2013), com resultados positivos quanto ao controle da expansão do solo por meio de tratamentos químicos. Por outro lado, a execução desses tratamentos em campo, muitas vezes não se consegue atingir os resultados esperados. Devido

à dificuldade penetração desses produtos nas zonas ativas do solo, principalmente a cal, pois se trata de um sólido em formato de pó, o que cria empecilhos na infiltração do material.

Dessa maneira, o objetivo do presente trabalho é avaliar se houve redução do potencial expansivo do solo da Rodovia BR-324 mais especificamente nos trechos dos KM-561 e 554, quando o mesmo foi tratado quimicamente em laboratório, adicionando-se cal e estabilizantes químicos em amostras indeformadas. A comparação dos resultados se deu através de ensaios de medida de expansão.

2 SOLOS EXPANSIVOS E MÉTODOS DE ESTABILIZAÇÃO

Solos expansivos são solos não saturados de grande atividade e baixa permeabilidade, composto por silte e argila (partículas inferiores a 0,075 mm), possuem em sua constituição mineralógica argilominerais de estruturas laminares do tipo 2:1 dos grupos vermiculita, clorita e montmorilonita. Estes solos são de caráter bastante diversificado, tendo seu comportamento diretamente ligado à evolução pedogenética dos solos, diante dos processos de intemperismos (PRESA, 1984). Essas estruturas laminares referem-se ao número de camadas de tetraedros de SiO_4 e de octaedros de $\text{Al}_2(\text{OH})_6$, respectivamente, que entram na constituição da cadeia unitária da estrutura cristalina do argilomineral (SANTOS, 1989), formando diferentes grupos, tais como os das caulinitas, ilitas e montmorilonitas.

Grande parte dos solos de natureza expansiva é composto por argilominerais, silicatos hidratados, que pertencem ao grupo dos filossilicatos originados por meio de processos hidrotermais, ígneos e metamórficos. A formação deste mineral que constitui as argilas (materiais de partículas inferiores a 0,002mm) é originada pela decomposição do feldspato, olivina, piroxênio e anfibólios, sendo formada também por matéria orgânica e outras impurezas. Estes minerais fazem com que o solo possua grandes valores de limites de liquidez e plasticidade, além de serem muito instáveis quando em contato com a água, reduzindo a resistência quando umedecidos (PRESA, 1984).

A expansibilidade dos argilominerais é um dos fatores mais importantes que influenciam no comportamento dos materiais argílicos, devido a grande capacidade de absorção de água. Isso ocorre devido às partículas de argila serem carregadas com cargas negativas que, quando em contato com soluções aquosas composta de íons positivos, faz com que ocorra uma força de atração entre as partículas, a fim de equilibrar todas as cargas negativas contidas na superfície da argila, formando assim uma camada adsorvida, ou seja, a molécula de água se prende nas bordas no mineral que estão carregados negativamente.

De acordo com DAS (2011) e MITCHELL (1976), a capacidade de expansão não depende somente da fração fina, mas sim do tipo de mineral que compõem esse número de finos. De forma geral, pode-se dizer que todo solo apresenta valores de expansão quando, por qualquer motivo, a tensão efetiva do solo é reduzida, existindo um pequeno aumento no seu índice de vazios, indicando que houve uma pequena expansão. Isso se dá porque o solo tem um comportamento elástico plástico, isto é, quando há alívio de tensão, o solo tende a voltar ao seu estado inicial. Sendo assim, admitem-se como solos expansivos aqueles que apresentam expansões superiores a 1%, sendo que essa variação volumétrica deve-se apenas à alteração de umidade sem qualquer variação de carga.

Desse modo, o fenômeno de instabilidade volumétrica de solos devido à variação de umidade é complexo, sendo influenciado por vários fatores, entre os quais se incluem o tipo de solo, condicionantes climáticos e estados de tensão até a sua composição (DELGADO, 1986). Neste caso, se ocorrer aumento de sucção, o volume do solo diminuirá, caso a sucção diminua, o volume do solo aumentará, fazendo com que ocorra o surgimento de problemas nas edificações devido ao fenômeno de expansão e contração do solo. Sendo assim, a deformação volumétrica “pode ocorrer tanto devido a mudanças na sucção quanto mudanças na carga aplicada” (Mahler, 1994, p. 24). Essa característica torna-se mais expressiva quando o solo tem um elevado valor de superfície específica, pois significa uma maior interação água/partícula.

O processo de expansão do solo pode ocorrer por meio de mecanismos químico-físicos e mecânicos. Além de fatores, como condicionantes climáticos, infiltrações, irrigações e composição mineralógica do solo. Esses são considerados como fatores internos e externos que influenciam diretamente no fenômeno de expansão.

O mecanismo químico-físico se caracteriza quando a água é absorvida somente pela parte externa do argilomineral, ou seja, a água forma camadas monomoleculares sobre a partícula do argilomineral, afastando as unidades estruturais e as próprias partículas uma das outras, caso que se predomina em solos com presença de illita em sua composição. Dentro desse processo químico ainda ocorre a repulsão osmótica, caso que ocorre nas montmorilonitas com íons trocáveis, em que a água consegue penetrar na estrutura interna do argilomineral, ocasionando uma repulsão entre as partículas devido às diferentes concentrações catiônicas nas camadas de argila. Já o mecânico ocorre devido às forças de descompressão elásticas. Estas ações fazem com que ocorra um alívio de tensão, provocando assim, um aumento de volume da massa de solo.

A aplicação de técnicas de estabilização de solos, tem-se tornado cada vez mais

importante na correção de problemas. Atualmente, existem duas formas de estabilização, os processos mecânicos e químicos. Os processos de estabilização mecânica consistem apenas na melhoria do material, por meio da compactação e adição de outros materiais, como areia e brita. Já a estabilização química consiste na utilização de aditivos com o intuito de melhorar as propriedades físicas e mecânicas do solo, como a cal, cimento Portland, silicatos de sódio, materiais betuminosos, resinas, óleos, compostos de fósforo e até mesmo resíduos industriais (MAKUSA, 2013; MEDINA, 1987). Vale ressaltar que a escolha por uma ou outra técnica de estabilização é influenciada por uma série de fatores, dentre os quais se destacam os custos totais da obra, as características dos materiais, as propriedades que devem ser corrigidas, além da própria finalidade da obra.

Devido à grande aplicabilidade e baixo custo, a cal vem ganhando grande destaque no campo da construção civil, sendo atualmente o método de estabilização químico mais utilizado para melhorar a qualidade do solo, no que se refere à redução de expansão. Isso porque todos os solos de granulometria fina reagem quando em contato com a cal desencadeando reações que afetam benéficamente sua trabalhabilidade, plasticidade e principalmente seu caráter expansivo. A cal é um aglomerante aéreo obtido a partir da calcinação do calcário ou dolomitos através de decomposição térmica e posteriormente hidratação formando o hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 .

Segundo Bell (1996), devido a grande capacidade de troca catiônica, todos os argilominerais presentes em solos argilosos reagem com o cal. No entanto, para as argilas que contêm em sua constituição mineralógica a montmorilonita, os efeitos da estabilização com cal são ainda mais expressivos. Isto porque nos solos expansivos as reações ocorrem mais rapidamente por conta das montmorilonitas possuírem maior capacidade de troca catiônica que argilominerais não expansivos, como a caulinita. Segundo o mesmo autor, ao se tratar de resistência, os solos compostos por montmorilonitas adquirem maior resistência nos primeiros dias de cura do que as caulinitas. Porém para maior tempo de cura, as caulinitas apresentam maior ganho de resistência.

A adição de cal em solos finos e em presença de água desencadeiam reações químicas que podem ser divididas em reações imediatas e lentas. As reações imediatas também consideradas como de curto prazo, são responsáveis pela modificação da estrutura do solo fazendo com que ocorra redução da plasticidade e volume, são caracterizadas pela alteração do pH, reações de floculação/aglomeração e troca catiônica. Já as reações lentas também chamadas de reações em longo prazo, são aquelas em que durante o processo de estabilização ocorre formação de materiais com características ligantes provocando assim aumento da

resistência do solo, são caracterizadas pelas reações pozolânicas e carbonatação (THOMÉ, 1994 e GUIMARÃES, 2002).

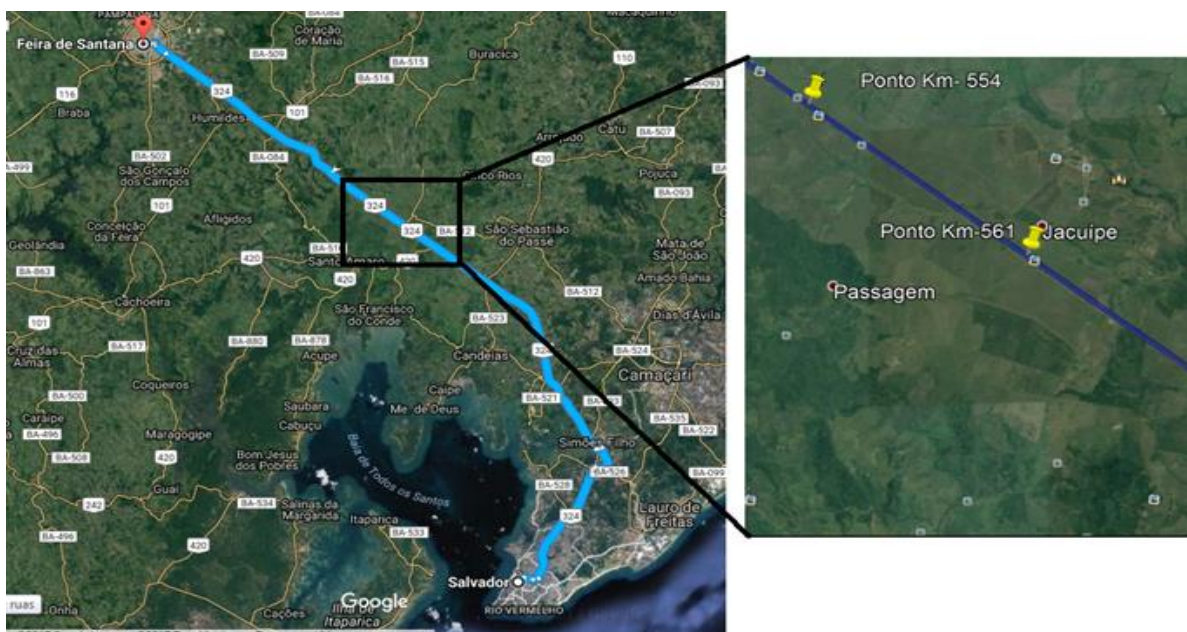
Já o tratamento com produtos químicos, a base de óleos e resinas vegetais atuam neutralizando as cargas negativas presentes na superfície das partículas da argila, por meio de trocas de cátions permanentes, evitando assim o surgimento da camada de íons ligados à superfície da partícula, cuja existência impede a aproximação dos grãos. Tornando a partícula de argila eletricamente equilibrada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local de estudo

A figura 1 apresenta os pontos de coleta do solo estudado no trecho da BR-324 entre Salvador e Feira de Santana. A região estudada está localizada em uma área de grande importância econômica para o estado devido à existência de dezenas de indústrias, como COPEC (Polo Petroquímico de Camaçari) e o CIA (Centro Industrial de Aratu), além da existência de refinaria de extração e produção de petróleo e grande produção agrícola de cana de açúcar, como também vários quilômetros de estradas pavimentadas que ligam cidades como Camaçari, Santo Amaro, São Francisco do Conde à capital do estado da Bahia. Esta região tem como peculiaridade a existência de massapê, um solo com grande quantidade de finos, com alto grau de compressibilidade e grande capacidade de absorver água.

Figura 1 - Indicação dos pontos de coleta na BR-324



Fonte: Google Earth (2018)

Nos pontos dos KM-554 e 561 (Salvador- Feira de Santana) indicados na figura 1 foram coletadas amostras deformadas para a realização dos ensaios de caracterização geotécnica e amostras indeformadas para os ensaios de expansão.

3.2 Estabilizante químico usados

O Homy Solo GB®, estabilizante utilizado nos ensaios, foi fornecido pela empresa Engpiso. É um produto químico composto, líquido, orgânico-metálico, alcalino, derivado de hidrocarbonetos insaturados e de coloração mel e produzido pela Homy Indústria e Comércio de Produtos Químicos LTDA. De acordo com o produtor, o Homy solo GB® é um aditivo que ao ser diluído em água necessita da incorporação de um reagente, que pode ser o sulfato de alumínio ou a cal para produzir o efeito de melhoramento.

A cal usada foi fornecida pela empresa Engpiso, é uma cal hidratada do tipo CH-I formada por, basicamente, hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor que 5%. Esta cal é produzida pela empresa Qualitycal Indústria e Comércio LTDA situada no estado da Bahia.

3.3 Métodos

3.3.1 Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica dos solos coletados nos trechos dos KM 554 e 561 da BR324 foi realizada segundo os procedimentos indicados nas NBR 6457: Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização - Método de ensaio; NBR 7181: Solo Análise granulométrica - Métodos de ensaio; NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica; NBR 6459: Solo Determinação do Limite de Liquidez – Método de ensaio; NBR 7180: Solo Determinação do Limite de Plasticidade – Método de ensaio.

3.3.2 Determinação da Expansão

Para a determinação da expansibilidade dos solos foram realizados ensaios de pressão de expansão para o solo sem tratamento, chamado de natural, em diferentes valores de umidade.

O ensaio de pressão de expansão mede a pressão necessária para que o solo não

expanda quando umedecido. Para a realização deste ensaio foram moldados corpos de prova em anéis metálicos, em diferentes condições de umidade, onde em seguida foram colocados na célula de adensamento e na prensa, ajustando sobre o cabeçote um extensômetro que registra a variação volumétrica do solo quando este for umedecido. Adiciona-se a água pura dentro da célula até a completa saturação do solo e, em seguida, colocam-se pesos no braço da prensa na quantidade suficiente para impedir qualquer aumento de volume. O peso é inserido e um intervalo de tempo é aguardado, para que o sistema possa novamente se reequilibrar, repetindo este procedimento até que o extensômetro volte ao valor que foi adotado como referência e o sistema chegue ao equilíbrio.

A pressão de expansão é determinada pelo somatório das cargas colocadas na prensa, dividido pela área no anel metálico, ou seja, as cargas que fizeram o sistema voltar às mesmas condições iniciais do ensaio. Na figura 2 é mostrado o processo de montagem dos corpos de prova e em seguida o ensaio sendo executado na prensa de expansão.

Figura 2 - Moldagem do anel e prensa para ensaio de pressão de expansão



Fonte: Autor (2018)

Havendo o equilíbrio do sistema, o ensaio é desmontando, o anel é novamente pesado e amostras da massa de solo são retiradas para a determinação da sua umidade final. Após os ensaios com o solo natural, com diferentes teores de umidade, foi iniciado o processo de estabilização química das amostras. Vale ressaltar que foram utilizadas diferentes dosagens dos estabilizantes químicos e diferentes formas de tratamento (saturação na prensa e infiltração prévia).

No solo do KM-561 foi realizado um tratamento prévio da amostra indeformada, a qual foi submetida a tratamento com uma solução contendo água, estabilizante químico e a cal (dosagem de 3% de cal e 5% do estabilizante Homy solo, ambos em relação à massa seca da amostra), infiltrados por meio de uma cava feita no topo da amostra, conforme a figura 3.

O líquido de tratamento foi deixado infiltrar por várias semanas, contudo neste processo observou-se que a cal sedimentava na superfície da amostra, apresentando dificuldade de infiltração. Além disso, o solo apresentou significativo trincamento, dificultando a moldagem do corpo de prova (CP) para a realização dos ensaios. Foi possível moldar um CP na região onde se procedeu à infiltração.

Figura 3- Tratamento prévio da amostra do KM-561



Fonte: Autor (2018)

O segundo CP foi moldado na camada inferior que aparentemente não ocorreu a infiltração da solução estabilizante. Frente às dificuldades operacionais na infiltração e moldagem dos ensaios resolveu-se alterar a metodologia. A partir de então, os corpos de provas do KM-554 foram moldados com o solo natural (sem tratamento), e apenas saturados com o líquido estabilizante na prensa de adensamento. A solução utilizada no processo de saturação foi feita com as seguintes misturas: primeira mistura foi elaborada com concentração 0,1% de estabilizante Homy solo em relação à massa de solo do anel. A segunda com concentração 0,1% de estabilizante Homy solo e 3% de cal em relação à massa de solo do anel. E a terceira solução utilizada tinha 2,5% do estabilizante Homy solo em relação à massa de água utilizada no processo de inundação da célula. O procedimento dos ensaios ocorreu da mesma maneira que os realizados com solo em condições naturais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização geotécnica

A tabela 1 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de caracterização para as amostras estudadas.

Tabela 1 - Resumo dos resultados obtidos através dos ensaios de caracterização e a classificação do solo

Características geotécnicas	KM- 561	KM-554
Pedreg. (%)	0	0
Areia (%)	16	6
Silte (%)	30	36
Argila (%)	54	58
WL(%)	79	124
WP (%)	45	49
IP (%)	34	75
A (%)	0,63	1,29
ρ_s (g/cm ³)	2,891	2,911
SUCS	MH	MH
AASHTO	A-7-5	A-7-5

WL- Limite de Liquidez; WP- Limite de Plasticidade;
IP- Índice de Plasticidade; A- Atividade

Fonte: Autor (2018)

Os solos estudados são compostos por mais de 80% de finos (partículas menores que 0,075 mm), com pouca areia em suas composições e sem nenhum vestígio de pedregulho. O solo do KM-561 foi classificado com uma argila silto-arenosa e do KM- 554 como uma argila siltosa com pouca areia e, segundo a SUCS, os dois solos foram classificados como um silte de alta plasticidade (MH).

As duas amostras mantiveram a mesma classificação, A-7-5, segundo a AASTHO não sendo, portanto, indicados para a aplicação em base e sub-base de pavimentos. Os solos apresentaram altos valores de índice de plasticidade (IP>15%), sendo o solo do KM-554 o que apresentou maior valor de IP (75%) a atividade de 1,29.

As massas específicas dos grãos encontradas nos solos são relativamente altas, indicando um certo grau de laterização.

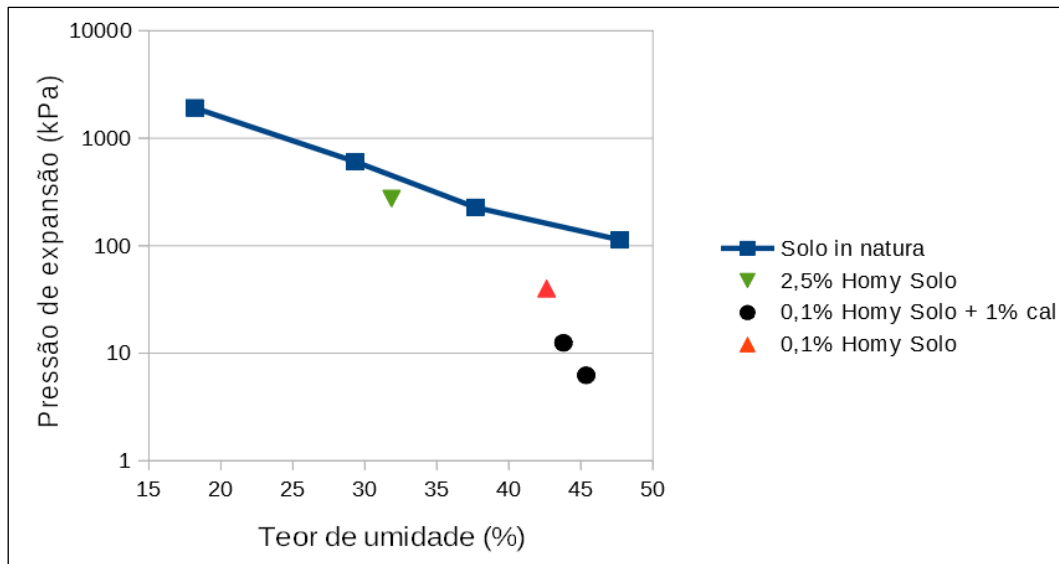
4.2 Ensaio de pressão de expansão

As figuras 4 e 5 apresentam os resultados obtidos no ensaio de pressão de expansão para as amostras estudadas dos KM 554 e 561, respectivamente.

Para o solo natural, foi possível perceber que à medida que a umidade diminui, os

valores de pressão de expansão aumentam. Variando de 100 KPa a 1.909 KPa, para os solos do KM-554 e 3,2 KPa a 200 KPa, para o solo do KM-561.

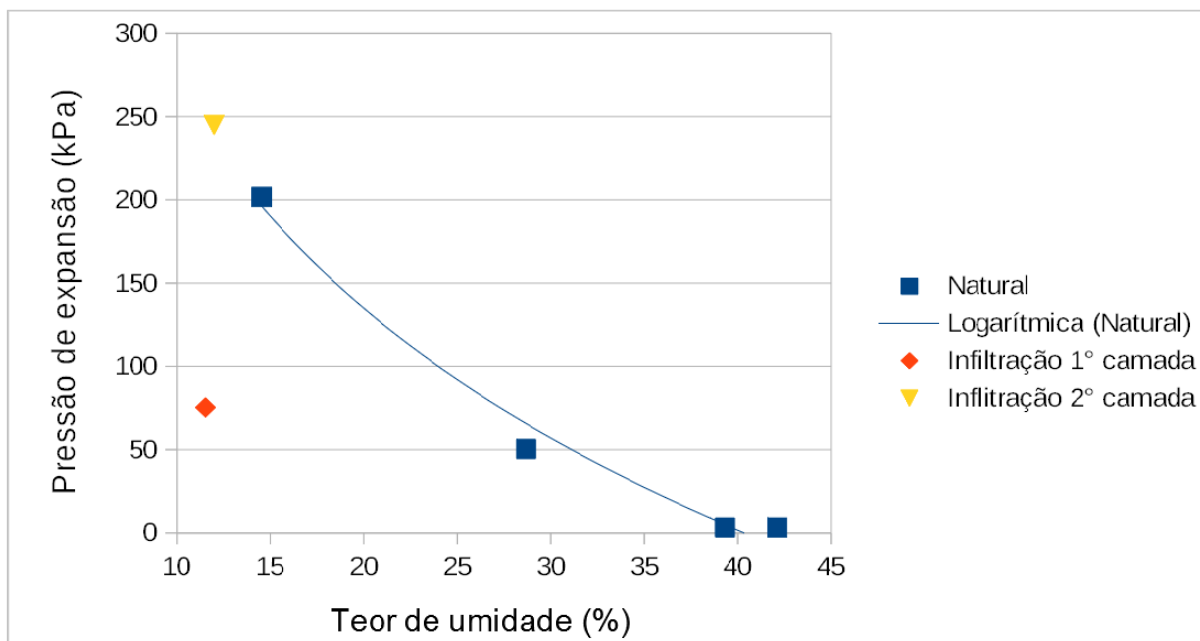
Figura 4- Apresentação dos resultados do ensaio de expansão do KM-554



Fonte- autor (2018)

O solo do KM-554 foi o que apresentou os maiores valores de pressão de expansão. Para este solo, mesmo para altos valores de umidade, como por exemplo, umidade de 48%, obteve-se pressão de expansão de 100 KPa (ver figura 4). Para o KM-561, a pressão de expansão chegou a 200 KPa para amostras com umidade em torno de 15%.

Figura 5- Apresentação dos resultados do ensaio de expansão do KM-561



Fonte: Autor (2018)

Após o tratamento das amostras, pode se perceber que as pressões de expansão diminuíram, principalmente para a amostra do KM-554 quando tratada com 0,1% de estabilizante Homy Solo e 1% de cal. Os valores das pressões de expansão variam de 12,5 KPa a 6 KPa para umidade em torno de 43% a 45%. Para a condição em que o solo foi saturado somente com água e 2,5% do estabilizante Homy Solo, o resultado não foi tão significativo, pois a pressão de expansão atingiu 274 KPa para um valor de umidade relativamente alta (31%).

Para a amostra do KM 561, o tratamento prévio em cava evidenciou a eficácia da solução elaborada, pois o resultado demonstra uma diminuição no valor da pressão de expansão bastante significativo, com valor de 75,37 KPa e umidade de 11,55%, para o CP moldado na primeira camada. Por outro lado, pode-se afirmar que o resultado da pressão de expansão de 245 KPa obtido de CP moldado na segunda camada, converge com o da linha tendência (equação logarítmica: $y = -192,4\ln(x) + 711,35$ com R^2 de 0,98) obtida para o solo em estado natural. Evidenciando que a solução não conseguiu infiltrar nas camadas mais profundas da amostra. Com base nos resultados pode-se afirmar que onde houve infiltração ocorreu uma boa redução da pressão de expansão, porém onde a solução não infiltrou praticamente não houve redução do potencial expansivo do material em estudo. Mostrando assim que a aplicação deste método de tratamento torna-se um desafio em campo pela dificuldade de se conseguir infiltrar a solução nas camadas mais profundas do solo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou avaliar as características e o potencial de expansão do um solo de massapê da BR-324, nos KM-561 e 554, através de ensaios laboratoriais para medidas de pressão de expansão em condições naturais e tratadas quimicamente.

Os solos estudados apresentaram mais de 80% de finos (partículas menores que 0,075 mm) e índice de plasticidade maior que 20%. Os solos dos KM-561 e 554 foram classificados, segundo a SUCS, como MH e, segundo a AASHTO, como A-7-5. Os ensaios realizados revelaram que, à medida que a umidade das amostras diminui, os valores de pressão de expansão aumentam. Encontrou-se pressões de expansão de 3,2 a 1909 KPa para os solos estudados.

Após o tratamento químico do solo os valores de pressão de expansão reduziram quando comparados com os valores de pressão do solo natural. Mostrando assim uma boa eficiência do tratamento químico para a redução da expansão com a cal e o estabilizante

Homy Solo. Vale ressaltar que estabilizante Homy Solo tem melhor desempenho no controle da expansão quando combinado com cal.

Embora se tenha comprovado a eficiência do uso da cal para o tratamento no controle do potencial expansivo a maior dificuldade do processo encontra-se em conseguir fazer a solução atingir as camadas mais profundas do solo.

REFERÊNCIAS

AASHTO – **American Association for State Highway and Transportation Officials. Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing.** Specifications, part 1 and tests, part 2, Washington, 1978.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181:** Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6508:** Determinação da Massa Específica - Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm. Rio de Janeiro, 1984, 8p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459:** Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984, 6p.

BARBOSA, Valquiria. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal.** Recife, 2013. 111p.

BELL, F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils. **Engineering Geology**, v.42, p. 223-237, 1996.

CHAGAS, G.S; MOURA, A.S.; DE ARAUJO CARNEIRO, A.C. Utilização da compactação para redução do potencial de colapso/expansão de um solo silto argiloso de massapê da cidade de Icó-CE. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1, 2006.

CHEN, F. H. (1988). **Foundations on expansive soils**, Elsevier Science Publishers B. V. vol. XXII, 463 p.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** Tradução EZ2 Translate. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DELGADO, A. **Influencia de la trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno.** 1986. 564f. Tese. Universidad de Sevilla, Sevilla, 1986.

FERREIRA, S. R. D. M., Paiva, S. C. D., Morais, J. J. O., & Viana, R. B. **Expansion evaluation of a soil of the municipality of Paulista-PE improved with lime.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 2, 2017.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2ª ed. São

Paulo: PINI, 2002.

JONES, D.E. and HOLTZ, W.G. 1973. **Expansive soils** – the hidden disaster. Civil Eng., ASCE, New York, NY pp 87-89, Aug. 1973.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Sweden: Lulea University of Technology, 2013.

MAHLER, C.F. **Análise de obras assentes em solos colapsíveis e expansivos**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 1994.

MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos**. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1987.

MITCHELL, J. K. (1976). **Fundamentals of soil behavior**. Ed. John Wiley e Sons, Inc. New York, 443.p.

PAIVA, S. C.; LIMA, M. A. A.; FERREIRA, M. G. V. X.; FERREIRA, S. R. M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Revista Matéria**, vol. 21, n. 2, p. 437-449, 2007.

PRESA, E.P. **Deformabilidad de las arcillas expansivas baja succión controlada**. Centro de estudios y experimentación de obras Públicas, 274p., Madrid, 1984.

SANTOS, P.S. **Tecnologia de argilas**. Vol 1 fundamentos. São Paulo. 340 p., 1989.

THOMÉ, A. (1994). **Estudo do comportamento de um solo tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. Porto Alegre. p.3-5 e p.8-15. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.