

# Desenvolvimento de equipamento para estudo da pressão de expansão de misturas argilosas por umedecimento através da transferência de vapor

Rafaela Faciola Coelho de Souza

Docente, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, Brasil, rafaela.ferreira@ceca.ufal.br

Osni José Pejon

Docente, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Brasil, pejon@sc.usp.br

**RESUMO:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento de laboratório para medir pressões de expansão em amostras misturas argilosas e arenosas com bentonita a volume constante a partir do umedecimento pela técnica da transferência de vapor. Para realização dos ensaios por transferência de vapor foi desenvolvido um sistema fechado que permite a circulação de vapor de água do reservatório de solução salina até a célula edométrica. Esse reservatório externo permite a troca da solução para impor diferentes níveis de sucção sem comprometer o confinamento das amostras na célula edométrica. Os ensaios por transferência de vapor em misturas argilosas e arenosas com bentonita previamente secas ao ar, com elevados níveis de sucção, revelaram pressões de expansão medidas na ordem de 500 a 600 kPa. O sistema de imposição de sucção com controle de umidade relativa que impôs o umedecimento das amostras por transferência de vapor correspondeu aos valores finais desejados de sucção no valor de 5.000 kPa verificados a partir de papéis filtros inseridos dentro da célula edométrica durante os ensaios. No geral, o equipamento desenvolvido na pesquisa mostrou fácil manuseio, simples montagem e desempenho satisfatório. Os ensaios realizados nas prensas manuais com células edométricas conduzidos a partir da técnica da transferência de vapor permitiram maior controle dos carregamentos mantendo o volume da amostra constante, além de viabilizar o umedecimento por vapor.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaio Edométrico, Pressão de Expansão, Transferência de Vapor.

**ABSTRACT:** This paper presents the development of laboratory equipment to measure swelling pressure in samples of clayey and sandy mixtures with bentonite at a constant volume based on wetting using the vapor transfer technique. To carry out the vapor transfer tests, a closed system was developed that allows the circulation of water vapor from the saline solution reservoir to the oedometer cell. This external reservoir allows the solution to be changed to import different suction levels without compromising the confinement of the samples in the oedometric cell. Vapor transfer tests on clayey and sandy mixtures with bentonite previously dried in air, with high levels of extraction, revealed swelling pressure measured in the order of 500 to 600 kPa. The suction imposition system with relative humidity control that imposes the moistening of the samples by vapor transfer corresponded to the desired final suction values of 5,000 kPa selected from paper filters inserted inside the oedometric cell during the tests. Overall, the equipment developed in the research showed easy, simple assembly and superior performance. The tests carried out on manual presses with extended oedometric cells using the vapor transfer technique allowed greater control of loading, keeping the sample volume constant, in addition to enabling steam wetting.

**KEYWORDS:** Oedometric Test; Swelling Pressure; Vapor Transfer.

## 1 SOLOS EXPANSIVOS

A ocorrência de solos com potencial expansivo acarreta inúmeros problemas em obras de engenharia. Esse tipo de material apresenta um comportamento peculiar que se manifesta durante o umedecimento e secagem, resultando em uma variação de volume, o que provoca levantamentos ou deslocamentos das estruturas. Essa variação de volume origina uma pressão de expansão causada pela presença de argilominerais com características que afetam as propriedades mecânicas do solo. Pejon (2000), Pereira (2004) e outros autores, mostraram que o fenômeno de expansão depende de inúmeros fatores internos e externos, dentre estes: a composição mineralógica, textura, micro e macro porosidade, variação volumétrica, e sucção. Essas características consequentemente estão relacionadas a problemas de solos não saturados, bem como da disponibilidade de água, tipo e quantidade de cátions trocáveis, e a interação entre a água e os cátions presentes.

### 1.1 Métodos para Medir a Pressão de Expansão

Há diferentes métodos para avaliar a pressão de expansão: sem o controle de sucção e com o controle de sucção. Os ensaios sem controle de sucção mais utilizados se restringem ao método da amostra a volume constante e os ensaios edométricos. Já o ensaio com controle de sucção utiliza uma célula edométrica, e foi proposto inicialmente por Escario e Sáez (1973) a fim de determinar as características de deformabilidade. O ensaio consiste em confinar a amostra em um anel similar ao do edômetro convencional. Os dispositivos de entrada e saída de água permitem o controle da variação de umidade, e consequente da sucção.

Em 1988, Esteban e Sáez adaptaram a técnica do edômetro para estudar o comportamento deformacional do solo sob condição de sucção elevada. O equipamento utilizado para o ensaio consiste em uma câmara hermética que suporta uma amostra que é confinada por um anel de aço e pedras porosas com tamanhos adequados de poros. O aparelho possui um depósito destinado às soluções para implementar a umidade relativa, e também um pistão que permite medir a deformação da amostra e aplicação de tensões verticais. Essa técnica comumente conhecida como técnica da transferência de vapor.

Lee *et al.* (2012) analisaram a pressão de expansão de bentonitas compactadas em diferentes densidades secas face à diferentes concentrações de solução salina de NaCl pela VET. As densidades variaram entre 1,5 a 1,7 g/cm<sup>3</sup>, e as concentrações utilizadas foram de 0,04M e 0,4M. Os resultados dos ensaios mostraram que a pressão de expansão aumentou com o aumento da densidade. Em relação às concentrações de NaCl, a expansão foi maior na concentração de 0,04M, e a medida que aumentou para 0,4M essa pressão diminuiu.

Liang *et al.* (2021) analisaram o comportamento expansivo de amostras de solos argilosos através da medida de pressão de expansão considerando o umedecimento fornecido pela VET em elevados valores de sucção, e pela técnica osmótica (OT) para baixos valores de sucção. Os autores desenvolveram um equipamento que permitiu ensaiar as amostras tanto na técnica VET quanto na OT, e verificaram que desenvolvimento da pressão de expansão estava intimamente relacionado às características de retenção de água. Em alta sucção, a pressão de expansão resultou principalmente da hidratação intercadas; em baixa sucção, no entanto, a pressão de expansão era controlada pelo desenvolvimento de camadas duplas, acompanhada pelo colapso de alguns macroporos.

Partindo dessas premissas, este trabalho apresenta um estudo realizado com misturas de materiais argiloso e arenosos com bentonita a fim de medir a pressão de expansão através da técnica da transferência de vapor. Para tanto, um equipamento foi desenvolvido durante a pesquisa ao qual permite umedecer as amostras de solo através do vapor de água a partir do controle de sucção, e ao mesmo tempo medir a pressão que a amostra confere ao sistema à volume constante.

## 2 DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

Para medir a pressão de amostras argilosas com potencial expansivo o equipamento foi desenvolvido no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC da Universidade de São Paulo. Este equipamento permite medir a pressão de expansão pela tentativa de variação de volume da amostra por meio do controle de sucção por imposição de umidade relativa. O termo “tentativa de variação de volume” é utilizado apenas para elucidar que a amostra tenta variar de volume, mas a técnica do ensaio não permite, uma vez que o volume mantém-se constante, e é medido apenas a pressão de expansão da amostra.

A técnica da imposição de umidade relativa consiste em impor níveis de sucção total à amostra por meio da pressão parcial de vapor de água que se encontra em equilíbrio com a água do solo. Ou seja, a umidade relativa conhecida pela concentração da solução salina permite saber qual a sucção que está sendo imposta.

Os ensaios foram realizados em amostras de solos secas ao ar, posteriormente compactadas em diferentes condições, por processo de umedecimento. A Tabela 1 apresenta o conjunto de amostras ensaiadas:

Tabela 1 – Amostras ensaiadas com a técnica da transferência de vapor.

Misturas Argilosas da Formação Corumbataí com Bentonita	Terminologia
Bentonita pura seca compactada	Bentonita
Amostra argilosa seca compactada com 70% de bentonita	Argiloso + 70%
Amostra argilosa seca compactada com 50% de bentonita	Argiloso + 50%
Amostra argilosa seca compactada com 30% de bentonita	Argiloso + 30%
Amostra argilosa seca compactada com 10% de bentonita	Argiloso + 10%
Amostra argilosa seca compactada com 5% de bentonita	Argiloso + 5%
Amostra argilosa seca compactada	Argiloso
Misturas Arenosas da Formação Botucatu com Bentonita	Terminologia
Amostra arenosa seca compactada com 70% de bentonita	Arenoso + 70%
Amostra arenosa seca compactada com 50% de bentonita	Arenoso + 50%
Amostra arenosa seca compactada com 30% de bentonita	Arenoso + 30%

Nos ensaios, foram impostas sucções de 5.000 kPa por meio de solução salina de NaCl preparada conforme a Norma ASTM E 104-85 (1991). As pressões de expansão foram medidas por meio de um sistema de aquisição de dados acoplado a uma célula de carga como mostra a Figura 1. O ensaio cessa quando a pressão da expansão é completamente mobilizada para o nível de expansão imposto pela solução salina.

Para a realização da transferência de vapor foi desenvolvido um sistema fechado que permite a circulação do vapor de água do reservatório de solução salina até a célula edométrica (Figura 1). Com esse sistema de reservatório externo é possível trocar a concentração da solução para impor diferentes níveis de sucção sem comprometer o confinamento do corpo de prova na célula edométrica. Para acelerar a transferência de umidade entre o vapor de água do reservatório de solução salina e o corpo de prova acoplado na célula edométrica optou-se utilizar uma bomba para forçar a circulação de vapor. Essa bomba tem a função de sugar o vapor de água do reservatório, e levar até a célula, trabalhando em um sistema fechado, e sem a contaminação do ar pelo funcionamento da mesma. A bomba utilizada para circulação foi uma adaptação de uma bomba de aquário, onde foram feitas algumas modificações para que o sistema ficasse completamente fechado.

Na Figura 1 é possível observar a prensa de expansão com o sistema de transferência de vapor desenvolvido nesta pesquisa. E na Figura 2 apresentam-se as peças [1], [2], [3] e [4] que compõem a célula edométrica e são montadas conforme o esquema mostrado na Figura 3.

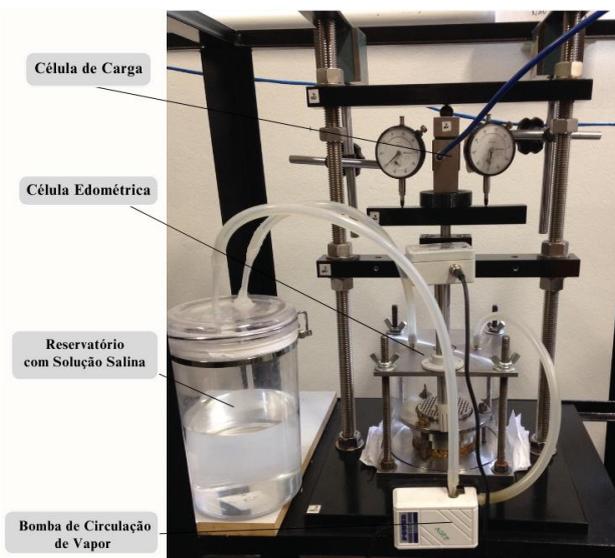


Figura 1 – Equipamento para medir pressão de expansão por transferência de vapor.

A Figura 2 apresenta as peças que compõem a célula edométrica e a Figura 3 mostra fases de montagem: em [a] coloca-se a pedra porosa de alta permeabilidade na base da célula; em [b] ilustra-se a colocação do anel onde é moldado o corpo de prova; acima do corpo de prova, em [c] é colocado o colar de aço para assegurar que o anel com o corpo de prova esteja fixo na pedra porosa inferior; na parte superior do anel com o corpo de prova [d], coloca-se uma pedra porosa idêntica à inferior, e logo acima a placa crivada que será o apoio do pistão de carregamento. Em [e] indica-se a colocação do cilindro de acrílico com os o-rings na parte inferior e superior. Por fim, em [f] é mostrada a célula montada com tampa e base inferior. Vale ressaltar que no momento da montagem, o corpo de prova é compactado diretamente no anel de aço, imediatamente antes do ensaio.



Figura 2 – Peças de montagem da célula edométrica para ensaio com a técnica da transferência de vapor.

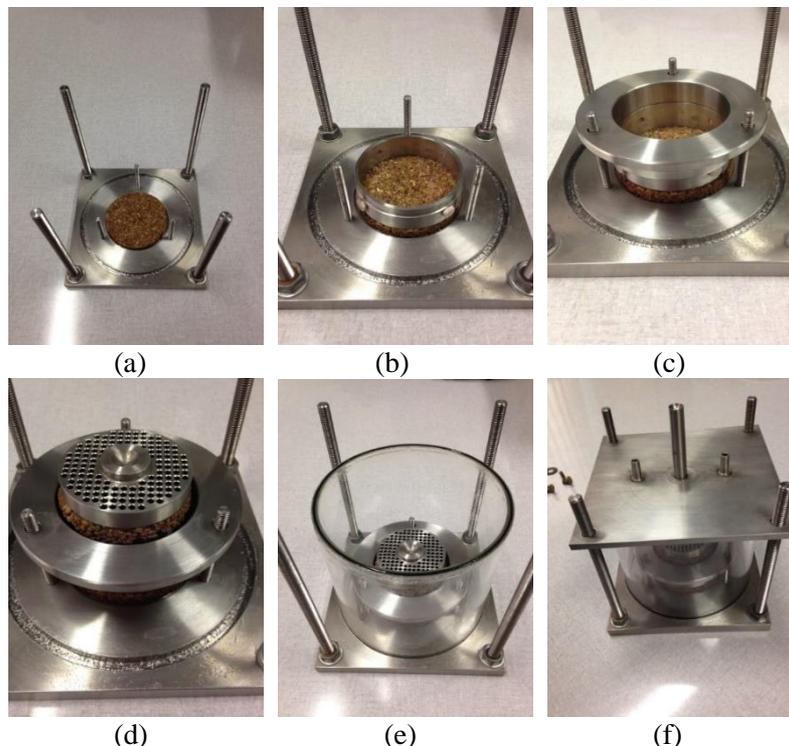


Figura 3 – (a) Pedra porosa inferior; (b) Anel porta-amostra acima da pedra porosa; (c) Colar de fixação do anel; (d) Pedra porosa superior + placa crivada; (e) Cilindro de acrílico; e (f) Tampa de célula edométrica.

O reservatório para armazenar a solução salina foi confeccionado a partir de um pote de acrílico com tampa hermética, o qual garantiu o não vazamento do vapor para o ambiente externo. Na Figura 4 é possível observar alguns cuidados que foram tomados a cada montagem do reservatório. Na tampa, foram feitos dois

furos para colagem de dois canos flexíveis para entrada e saída de vapor de água. Para evitar vazamentos, foi aplicada fita branca de vedação e graxa de vaselina em toda a extremidade do reservatório para assegurar o encaixe perfeito da tampa.



Figura 4 – Detalhes da preparação do reservatório de solução salina.

Ao total foram confeccionadas cinco prensas, sendo quatro para transferência de vapor e uma para expansão inundada (não apresentado neste artigo). Para isto, foi necessário desenvolver uma caixa coletora de dados, e também, alimentadora para as cinco células de carga que trabalharam ao mesmo tempo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 2.1 Material Argiloso, Misturas Argilosas e Bentonita

Os resultados dos ensaios conduzidos com a técnica da transferência de vapor foram realizados com amostras compactadas da Formação Corumbataí misturadas com bentonita estão mostrados na Figura 5. As amostras foram previamente secas ao ar, misturadas nas respectivas porcentagens desejadas e, em seguida, compactadas no anel de ensaio. Vale ressaltar que essas amostras de solo argiloso foram misturadas com bentonita em diferentes porcentagens para testar o equipamento e também para analisar como se desenvolvia as pressões de expansão e parâmetros físicos das amostras. Os índices físicos das amostras estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices físicos das amostras argilosas compactadas misturadas com bentonita antes do ensaio.

Amostra	W <sub>equilíbrio</sub> (%)	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	e -	n %	Sr %
Bentonita	12,82	1,720	1,52	2,74	0,80	44,35	44,08
Argiloso + 70% Bent.	8,90	1,670	1,53	2,72	0,78	43,73	31,21
Argiloso + 50% Bent.	8,64	1,660	1,53	2,71	0,78	43,73	30,18
Argiloso + 30% Bent.	6,83	1,646	1,54	2,71	0,76	43,26	24,32
Argiloso + 10% Bent.	2,62	1,596	1,56	2,71	0,75	42,71	9,54
Argiloso + 5% Bent.	2,11	1,572	1,54	2,71	0,76	43,27	7,51
Seca/ Seca ao Ar	1,52	1,605	1,58	2,69	0,70	41,21	5,83

Durante todos os ensaios realizados com transferência de vapor foi imposto, apenas, um único nível de sucção às amostras, no valor de 5.000 kPa por meio da solução salina de NaCl. Este nível de sucção promoveu expansão frente à atmosfera de umedecimento, visto que, as amostras encontravam-se na condição seca com sucções mais elevadas. As amostras com sucções mais elevadas para garantir o umedecimento durante o ensaio de expansão, foram previamente preparadas em dessecadores à vácuo controlando a sucção através de curvas de retenção.

As pressões de expansão medidas no ensaio com transferência de vapor são apresentadas na Figura 5 por meio das curvas de pressão de expansão *versus* o tempo de cada ensaio. É possível notar que as pressões máximas foram entre 100 e 800 kPa, sendo o aumento gradativo e proporcional ao aumento da porcentagem de bentonita.

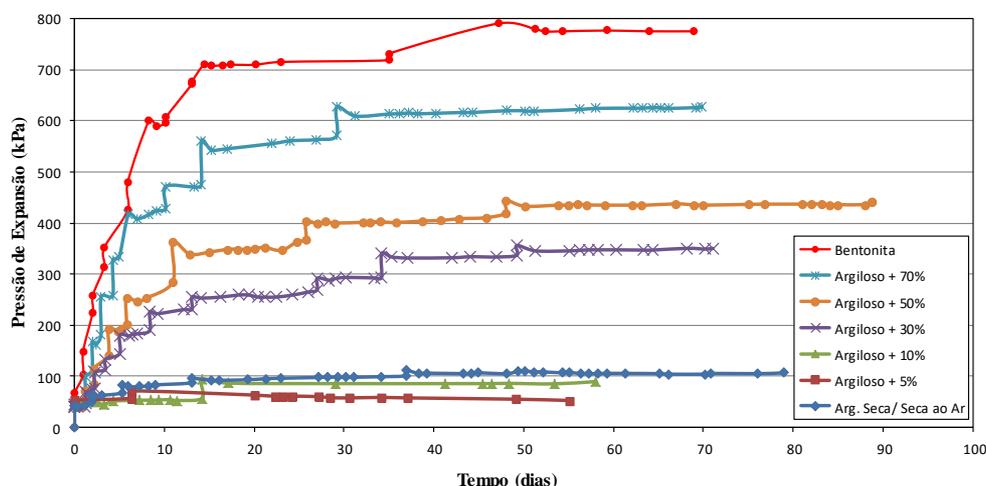


Figura 5 – Pressões de expansão em amostras argilosas compactadas com bentonita.

A Tabela 3 apresenta as sucções iniciais das amostras antes do ensaio de expansão calculadas, também, pela Lei de Kelvin como propõe Fredlund e Rahardjo (1993), e as pressões máximas de expansão. É possível notar que não houve uma uniformidade entre as condições iniciais de sucção, mesmo assim, os resultados mostraram valores consistentes em relação ao aumento da pressão de expansão com o aumento no teor de bentonita da mistura.

Tabela 3 – Sucções iniciais antes dos ensaios das amostras argilosas compactadas misturadas com bentonita e máximas pressões de expansão ao final dos ensaios..

Amostra	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Sucção Inicial (MPa)*	Wequilíbrio (%)	P <sub>máxima</sub> (kPa)
Bentonita	24,4	57,3	76,5	12,82	777,15
Argiloso + 70% Bent.	22,8	61	67,6	8,90	627,15
Argiloso + 50% Bent.	23,3	70	48,8	8,64	441,65
Argiloso + 30% Bent.	23,5	58	74,6	6,83	356,15
Argiloso + 10% Bent.	26,2	57	77,7	2,62	94,65
Argiloso + 5% Bent.	25,7	39	130	2,11	71,15
Seca/ Seca ao Ar	21	74	40,9	1,52	109,65

\*Sucção determinada com base na umidade relativa antes da compactação.

A máxima pressão de expansão obtida nas misturas com material argiloso foi justificada pela elevada capacidade de absorção de água, que está intimamente ligada, mais uma vez, com as condições iniciais de sucção imposta, o que permitiu tal variação de volume. Assim, ficou evidente a importância da porcentagem de bentonita nas pressões de expansão. No que se refere às condições iniciais, as amostras mais secas revelaram maior expansão. Na literatura, diversos autores propuseram utilizar misturas de materiais argilosos e arenosos compactados para aplicação em barreiras de resíduo radioativo em diferentes densidades secas ( $\rho_d$ ) a fim de verificar o comportamento expansivo dos mesmos, tais como Delage *et al.* (1998), Lee *et al.* (2012) e Cui *et al.* (2012).

## 2.2 Misturas Arenosas com Bentonita

Os resultados dos ensaios conduzidos com a técnica da transferência de vapor em misturas arenosas compactadas da Formação Botucatu com bentonita são mostrados na Figura 6. As amostras foram previamente secas ao ar, misturadas nas respectivas porcentagens desejadas, e em seguida compactadas no cilindro de ensaio. Os índices físicos das amostras estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Índices físicos das amostras arenosas compactadas da Formação Botucatu misturadas com bentonita antes do ensaio de expansão por transferência de vapor.

Amostra	Wequilíbrio (%)	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	e -	n %	Sr %
Arenoso + 70% Bent.	8,48	1,90	1,75	2,71	0,55	35,33	42,00
Arenoso + 50% Bent.	6,25	1,75	1,65	2,68	0,63	38,49	26,81
Arenoso + 30% Bent.	3,72	1,79	1,73	2,66	0,54	35,02	18,37

A Figura 6 mostra as curvas de pressão de expansão *versus* o tempo de cada ensaio para as misturas de material arenoso com bentonita utilizando a técnica da transferência de vapor, sob sucção imposta de 5.000 kPa. Nota-se, também, que as pressões máximas foram entre 93 e 440 kPa, resultando do aumento gradativo e proporcional ao aumento da porcentagem de bentonita, como no ensaio inundado.

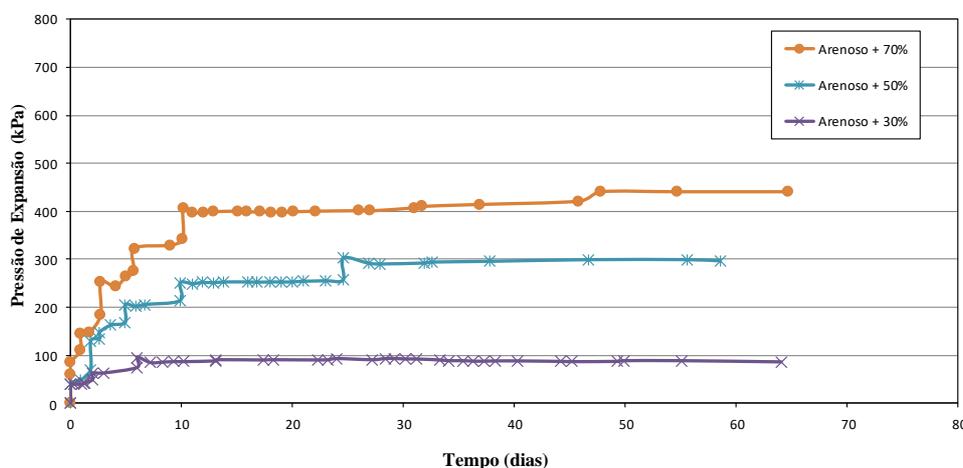


Figura 6 – Pressões de expansão em amostras arenosas compactadas com bentonita.

A pressão de expansão de materiais compactados em diferentes densidades foi estudada por diversos autores, como Komine e Ogata (2004), Çimer *et al.* (2012) e Lee *et al.* (2012). Esses autores afirmam que o efeito da densidade seca inicial de compactação afeta na máxima pressão de expansão que é aumentada para elevados valores de  $\rho_d$ . As máximas pressões de expansão são apresentadas na Tabela 5, o que confirma o comportamento expansivo da bentonita com material não expansivo. O aumento da expansão, também, é gradativo com o aumento da porcentagem de material, bem como, a amostra com maior densidade apresentou maior valor de expansão. A densidade da mistura com 50% apresentou valor abaixo do esperado, sendo esse fato podendo ser atribuído ao processo manual de compactação da misturas dentro do cilindro.

A Tabela 5 apresenta também as sucções iniciais das amostras antes do ensaio calculadas da mesma forma como nas misturas de material argiloso com bentonita. É possível notar que não houve uniformidade entre as condições iniciais de sucção, mesmo assim, os resultados mostraram-se consistentes em relação ao aumento da pressão de expansão com o aumento no teor de bentonita da mistura.

Tabela 5 – Sucções iniciais antes dos ensaios das amostras compactadas arenosas da Formação Botucatu misturadas com bentonita e máximas pressões de expansão ao final dos ensaios.

Amostra	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Sucção Inicial (MPa)*	Wequilíbrio (%)	P <sub>máxima</sub> (kPa)
Arenoso + 70% Bent.	23	56	79,3	8,48	440,65
Arenoso + 50% Bent.	23	55,2	81,3	6,25	299,15
Arenoso + 30% Bent.	23	71	46,9	3,72	93,15

\*Sucção determinada com base na umidade relativa ambiente antes da compactação.

A sucção final dos ensaios conduzidos com a transferência de vapor foi determinada por meio de papéis de filtro instalados no reservatório de solução salina, calculados a partir da pesagem desses papéis ao término

de cada ensaio. Verificou-se que no ambiente do reservatório os níveis de sucção estavam consistentes com o valor de sucção desejado de 5.000 kPa. Esse comportamento é corroborado com Liang *et al.* (2021) aos quais afirmam que as pressões de expansão aumentam gradativamente à medida em que a sucção diminuiu.

Após os ensaios com a técnica da transferência de vapor, as amostras foram submetidas à inundação para avaliar se a expansão máxima de todas as condições analisadas já haviam sido mobilizadas. Dessa forma, não foi possível determinar as umidades finais após a transferência de vapor.

#### 4 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou a pressão de expansão por transferência de vapor em diferentes misturas de material argiloso e material arenoso com bentonita. Para isto, desenvolveu-se um equipamento que mostrou desempenho satisfatório, de fácil manuseio e com elevada eficiência.

Em relação às pressões de expansão obtidas nas misturas afirma-se que os valores elevados para as misturas argilosas são justificados pela alta capacidade de absorção de água em relação às misturas arenosas, que está intimamente ligada, com as condições iniciais de sucção imposta. Assim, ficou evidente a importância da porcentagem de bentonita nas pressões de expansão.

No que se refere às condições iniciais, as amostras mais secas revelaram maior expansão. As sucções finais obtidas ao término de cada ensaio com a técnica da transferência de vapor foram correspondentes com o valor de sucção desejado de 5.000 kPa. Esse resultado confirma o perfeito funcionamento dos aparatos desenvolvidos a para impor e controlar a sucção nos corpos de prova.

A prensa manual permitiu maior controle do carregamento dos ensaios a volume constante, com boa resposta dos sinais da célula de carga, compatíveis com o sistema de aquisição de dados. As células edométricas utilizadas para a transferência de vapor também apresentaram ótimo desempenho, sem vazamentos e sem interrupção do ensaio.

#### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Cui, S.; Zhang, H.; Zhang, M. (2012) *Swelling characteristics of compacted GMZ bentonite-sand mixtures as a buffer/backfill material in China*. Engineering Geology 141 – 142, pp. 65 – 73.
- Delage, P.; Howat, M. D.; Cui, Y. J. (1998) *The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay*. Engineering Geology, 50, p. 31 – 48.
- Escario, V.; Saez, J. (1973). *Measured of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction*. In: Proc.3rd Int.Conf . Expansive Soils (Haifa),. p.195-200.
- Esteban, F.; Saez, J. (1988). *A device to measure the swelling characteristics of rock samples whit control of the suction up to very high values*. ISRM, Symposium on rock mech. and power plants, (Madrid), Vol. 2.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993) *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York, John Wiley & Sons, Inc.1993. p.1-6.
- Komine, H.; Ogata, N. (2004) *Predicting swelling characteristics of bentonites*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, Vol: 130, No.8., pp 818-829.
- Liang, W.; Yan, R.; Xu, Y.; Zhang, Q.; Tian, H.; Wei, C. (2021) *Swelling pressure of compacted expansive soil over a wide suction range*. Applied Clay Science 203.
- Pejon, O. J. (2000) *Estudo dos fenômenos de expansão de rochas sedimentares de granulometria fina. Identificação, caracterização e mapeamento*. Livre docência. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- Pereira, E. M. (2004) *Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guatiroba em ensaios com sucção controlada*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- Tang, C. S.; Tang, A. M.; Cui, Y. J.; Delage, P.; Schroeder, E. De Laure. (2011) *Investigating teh swelling pressure of compacted crushed-Collovo-Oxfordian claystone*. Physics and Chemistry of the Earth, 36, p. 1857 – 1866.