

DINÂMICA DA ÁGUA EM UM PERFIL DE VIA FÉRREA – PRINCIPAIS ASPECTOS E AVALIAÇÃO NUMÉRICA

José Pires
Guilherme Castro
Rosângela Motta
Liedi Bernucci
Robson Costa

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

A infraestrutura da via férrea tradicional é composta por materiais granulares que possuem seu comportamento influenciado pelas características geotécnicas e climáticas. Estas provocam uma variação do teor de umidade dos materiais, podendo impactar de maneira relevante no seu comportamento mecânico. Estudos a respeito da influência do teor de umidade e da pressão de sucção nos materiais geotécnicos são abordados especificamente pela mecânica dos solos não saturados aliados a aspectos hidrológicos e climáticos. Este trabalho almeja avaliar a respeito da capacidade de infiltração de água em um perfil da via férrea considerando as características geotécnicas e de retenção de água, além das climáticas locais por meio de ensaios laboratoriais e modelagem numérica (MEF). Os resultados mostraram uma significativa variação de umidade e sucção nas camadas de sublastro/subleito ao longo do tempo, além dos avanços das frentes de infiltração considerando distintos cenários climáticos mostrando que a adoção da umidade ótima para ensaios de resistência (ensaio CBR), por exemplo, pode não ser a mais adequada para estudos geotécnicos de ordem hidromecânica.

ABSTRACT

Traditional railway infrastructure is composed of granular materials whose behavior is influenced by the geotechnical and climatic characteristics. These cause a variation of the materials moisture content, and may impact in a relevant way on their mechanical behavior. Studies on the influence of moisture content and suction pressure on geotechnical materials are specifically addressed by unsaturated soil mechanics combined with hydrological and climatic aspects. This work aims to evaluate the water infiltration capacity in a railway profile, considering geotechnical and water retention characteristics, in addition to local climatic conditions through laboratory tests and numerical modeling (FEM). The results showed a significant variation of water content and suction in the subballast/subgrade layers over time, besides the advances of the infiltration fronts considering different climatic scenarios showing that the adoption of the optimum water content for resistance analysis (CBR tests), for example, may not be most suitable for hydro mechanical geotechnical studies.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais geotécnicos são compostos pelas partículas sólidas e inerentes vazios. Estes podem conter água ou ar. Entretanto, a proporção em que estas fases ocorrem nos solos tende a variar em função de um possível aporte hídrico. Tal aporte pode vir por meio de ascensões capilares, especialmente em solos coesivos, além de um volume de água a percolar, resultado de um balanço hídrico superficial que contempla eventos de precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial (run-off) etc. Tal contexto pode ser associado às vias férreas, dotadas de sistema de via composto por componentes sem capacidade de retenção de água (grade ferroviária e lastro), sendo assim, altamente susceptíveis a um aporte hídrico.

2. FLUXO EM SOLOS NÃO SATURADOS

A maioria dos conceitos e modelos clássicos da Mecânica dos Solos foi concebida considerando situações extremas de saturação, quais sejam, solo totalmente seco e solo saturado. Entretanto, uma grande porção da superfície da terra é coberta com solos que podem ser saturados ou não saturados (insaturados). Camadas superficiais de solo expostas à influência dos fatores climáticos podem estar não saturadas. Em regiões de clima tropical

podem ocorrer espessas camadas de solos residuais não saturados. Segundo Alonso *et al.* (1987), *apud* Rohm (1997) em regiões de climas áridos ou semi-áridos a saturação pode nunca ocorrer. Também solos compactados são solos não saturados. Assim, em algumas situações torna-se importante e necessário conhecer respostas dos solos diante das variações do teor de umidade, que podem causar deformações volumétricas de expansão ou de colapso.

O fluxo de água em solos, saturados ou não, ocorre devido ao gradiente hidráulico, que é dado pela combinação dos gradientes piezométricos e de elevação. A diferença no caso dos solos não saturados é a existência de pressões neutras negativas chamadas de pressão de sucção.

Comparando-se com a situação de saturação, o caminho do fluxo em solo não saturado fica mais tortuoso e restrito a uma área menor. Mesmo assim, considera-se que a lei de Darcy também é aplicável a solos não saturados (Fredlund e Rahardjo, 1993). Embora existam evidências de que nem sempre a sua validade se verifica, não se dispõe até o momento de modelos mais adequados que estejam suficientemente desenvolvidos a ponto de serem usados na prática acadêmica e/ou profissional (Iwata *et al.*, 1988, *apud* Rohm, 1997). Segundo Houston & Houston (1995), o uso da lei de Darcy para infiltração em solos secos é a aplicação menos acurada. Entretanto, à medida que o solo se torna úmido, a lei de Darcy melhor se aplica. Esta é aplicável também para o fluxo de água em solos não saturados, porém o coeficiente de permeabilidade de solo não saturado não pode ser adotado como um valor constante; ele se constitui em um coeficiente variável, função do teor de umidade ou sucção (Fredlund e Rahardjo, 1993). A lei de Darcy para solos não saturados pode ser, portanto, expressa pela Equação 1:

$$v = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (1)$$

em que v : velocidade da água;
 K : coeficiente de permeabilidade saturada;
 θ : teor de umidade volumétrico;
 $\frac{\partial H}{\partial z}$: gradiente de carga hidráulica na direção vertical.

Dessa forma, o coeficiente de permeabilidade da fase água (K), uma constante no fluxo saturado, torna-se função do grau de saturação/teor de umidade no caso de fluxo não saturado.

2.1 Pressão de sucção

Segundo Marinho (1997), sucção é uma pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas que faz com que o solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou diminuindo o seu teor de umidade/grau de saturação. Esta pressão pode ser considerada como responsável pela retenção de água que ocorre entre os grãos em um modelo de menisco, podendo ser definida como a diferença entre as pressões das fases de ar e água do referido menisco. Há de se ressaltar que mediante uma abordagem baseada na mecânica dos solos não saturados, a pressão de sucção é aquela responsável pelo comportamento hidromecânico do material e, assim, a avaliação quanto a variação desta se mostra especialmente relevante.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), a energia livre da água intersticial em um solo não saturado é a sucção total. De uma forma simplificada, pode-se separar a sucção em componente matricial e osmótica. Segundo Marinho (1997), a sucção matricial relaciona-se ao efeito da matriz do solo, isto é, a combinação do tipo de partículas e arranjo estrutural

enquanto que a parcela osmótica é derivada da medida da pressão parcial de vapor d'água em equilíbrio com uma solução idêntica em composição à água do solo. A sucção total pode ser descrita como a soma da sucção matricial e da sucção osmótica (Equação 2)

$$\Psi = (\mu_a - \mu_w) + \pi \quad (2)$$

em que Ψ : sucção total;
 $(\mu_a - \mu_w)$: sucção matricial, sendo, poro-pressão referente a fase ar (μ_a) e água (μ_w);
 π : sucção osmótica.

Há divergências em relação à influência da parcela osmótica no comportamento dos solos não saturados. Esta parece ser mais acentuada na existência de concentrações químicas elevadas na água do solo (ex: estudos de transportes de poluentes). Neste trabalho, a respeito de fluxo de água advindo de precipitações, considerou-se suficiente trabalhar com a sucção matricial.

2.2 Curva de retenção de água

A curva de retenção de água ou curva característica é a relação entre a quantidade de água retida nos poros do material granular (teor de umidade ou grau de saturação) e a força que é exercida para remover a água (pressão de sucção). Se uma alteração no teor de umidade ocorrer em algum ponto na massa de solo inicialmente em equilíbrio de umidade, a sucção neste ponto é alterada e um novo movimento da umidade através do solo ocorrerá até que uma nova condição de equilíbrio de sucção seja estabelecida. Segundo Croney (1952), alterações no teor de umidade que irão ocorrer durante o processo de redistribuição podem somente ser estimadas se a relação entre sucção e teor de umidade (curva de retenção) for conhecida. Esta, não é uma real característica do solo, pois não depende só da natureza do mesmo como também do estado do mesmo, como por exemplo, o índice de vazios. Segundo Fredlund e Xing (1993), os fatores principais que interferem na forma da curva característica dos solos são a distribuição granulométrica, porosimetria, estrutura e a mineralogia das partículas. Nos solos argilosos compactados, a retenção de água se dá por capilaridade e adsorção, enquanto que em solos granulares compactados os efeitos capilares são predominantes (Figura 1).

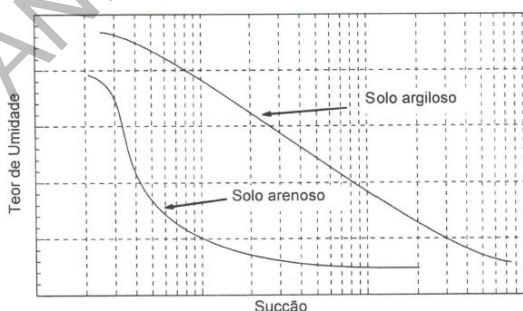


Figura 1: Curvas de retenção de água de um solo arenoso e de um solo argiloso (Stuermer, 1998).

A determinação da curva de retenção de água pode ser realizada em laboratório seguindo os procedimentos de secagem ou molhagem, ou por meio de equações analíticas. No caso da obtenção laboratorial, as curvas obtidas pelos dois procedimentos tendem a não coincidirem. Este fenômeno é denominado de histerese da curva de retenção de água, podendo ser atribuída a diversos fatores, dentre os quais a não uniformidade geométrica dos poros, bolhas de ar nos vazios do solo durante a fase de umedecimento, alterações na estrutura decorrentes da expansão ou contração, aos ciclos de umedecimento ou secagem etc.

Em geral, seja por meio laboratorial ou analiticamente, as curvas de retenção fornecem

principalmente, os seguintes parâmetros de interesse (Figura 2):

- Teor de umidade volumétrico saturado (θ_s): teor de umidade correspondente ao grau de saturação de 100%.
- Teor de umidade volumétrico residual (θ_r): teor de umidade a partir do qual é necessário um grande aumento no valor da sucção para a retirada de pequena quantidade de água.
- Ponto de entrada de ar do solo: sucção correspondente ao ponto de dessaturação.
- Índice de distribuição do tamanho dos poros (λ): inclinação da relação entre o teor de umidade e a sucção.

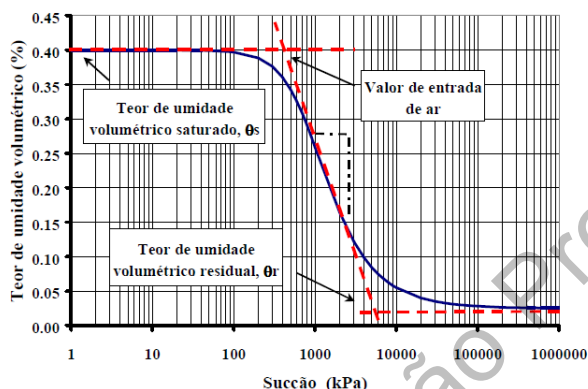


Figura 2: Principais pontos de interesse de uma curva de retenção de água.

A fim de representar as curvas de retenção por meios analíticos para serem utilizados como dados de entrada nos modelos numéricos considerando fluxo não saturado, há na literatura diversas equações para representar tais curvas, dentre as quais, os modelos de Van Genuchten (1980), mostrado através da Equação 3 e Fredlund e Xing (1994).

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha + \psi)^n} \right]^{1 - \frac{1}{n}} \quad (3)$$

em que θ , θ_r , θ_s : teor de umidade, residual e saturado;

α : valor de sucção de entrada de ar;

n : inclinação da curva característica após o ponto de entrada de ar.

3. BALANÇO HÍDRICO

O termo foi usado em 1944 pelo meteorologista C. Warren Thornwaite para se referir ao balanço de massa entre o fluxo de entrada de água de precipitação e o fluxo de saída por evaporação, transpiração, recarga do aquífero e escoamento (Dunne e Leopold, 1995). O balanço controla o estado de umidade da zona não saturada do solo entre a superfície do terreno e o nível d'água subterrâneo. Segundo Blight (1997), o balanço hídrico pode ser descrito como a quantidade de água que entra no solo a ser definida como a quantidade de água que sai para o meio externo adicionada pela mudança na água armazenada pelo solo. Segundo (Blight, 1997), o balanço hídrico poder ser definido pela Equação 4.

$$P - (I + R_{off}) = ET + R_{ech} + \Delta S \quad (4)$$

em que P : precipitação;

I : infiltração;

R_{off} : escoamento superficial;

ET : evaporação e transpiração;

R_{ech} : recarga de água do aquífero;

ΔS : variação do total de água armazenada.

Entretanto, no caso das vias férreas, o balanço hídrico a fornecer a quantidade de água resultante a percolar através dos componentes geotécnicos da infraestrutura da via (lastro, sublastro e subleito) pode ser determinado considerando-se as condições meteorológicas locais, escoamentos superficiais, infiltrações provenientes de possíveis falhas em sistemas de drenagens, além de possíveis ascensões capilares. No que se referem às condições meteorológicas, estas são normalmente representadas pelos valores de precipitação, evaporação, velocidade do vento, umidade relativa e temperatura absoluta local. A utilização destes está condicionada a disponibilidade destas informações e de um modelo numérico que utilize de forma adequada tais informações. A Equação 5 mostra o modelo analítico do balanço hídrico para o cálculo da infiltração, voltado ao caso das vias férreas, considerando-se alguns fenômenos geotécnicos típicos.

$$I = (P + \Delta S + ASC_{cap.}) - (R_{off} - E_V) \quad (5)$$

em que $ASC_{cap.}$: ascensão capilar;
 E_V : evaporação.

No caso dos perfis das vias férreas, a análise do balanço hídrico deve levar em consideração, além dos aspectos citados, a contribuição dos processos específicos relativos aos componentes da via como, por exemplo, um sublastro com a devida capacidade de retenção de água. Uma vez que a precipitação atinge a via, esta pode ter uma parte de certa forma interceptada pela grade ferroviária (trilhos e dormentes). Entretanto, a maior parte deste volume afeta a camada de lastro, que por não possuir características de retenção de água, permite o fluxo ser absorção, fazendo com que o aporte hídrico atinja a camada de sublastro e, possivelmente o subleito. Nestas duas últimas camadas, as propriedades referentes à capacidade de retenção de água irão de fato governar o comportamento hídrico ao longo do perfil. Entretanto, a água a incidir sobre a via férrea pode evaporar. A evaporação da água ocasiona um movimento ascendente em direção à superfície sendo influenciada pela temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, enquanto que um possível fluxo ascendente por capilaridade é função das propriedades hidráulicas do solo, como a permeabilidade hidráulica não saturada e o gradiente da água do solo (Miyazaki, 1993). A Figura 3 mostra esquema ilustrativo de balanço hídrico em um perfil típico de uma via férrea lastrada (Castro, 2019).

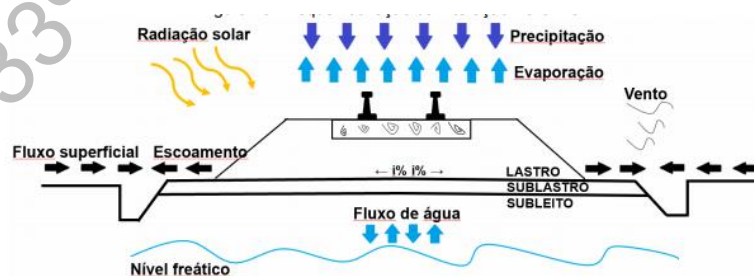


Figura 3: Elementos do balanço hídrico em uma via lastrada.

Nas últimas décadas, o estudo do fluxo não saturado se intensificou em muitas áreas de geotecnia, incluindo a área da pavimentação. Camacho (2002) estudou a respeito da variação das tensões de sucção em pavimentos rodoviários. Em relação às ferrovias, Lopes (2017), avaliou por meio do modelo numérica o fluxo de água considerando diferentes materiais da Estrada de Ferro Carajás (EFC) a partir das curvas de retenção obtidas em laboratório para diferentes solos tropicais. Castro (2018), desenvolveu um modelo numérico considerando o

fluxo não saturado com resultados em comparação em termos de pressão de sucção com aqueles obtidos por meio de instrumentação de sucção em uma via férrea, considerando-se dados climáticos e geotécnicos locais.

Existem diversas plataformas numéricas considerando-se o fluxo não saturado e a possibilidade de inserção de condições climáticas, dentre os quais Seep/W, Hydrus, UNSAT-H etc. Estes modelos possuem funções de certa forma semelhantes, distinguindo-se pelas possibilidades de contorno e equacionamentos. Por exemplo, em relação às condições climáticas e a forma de consideração das condicionantes geotécnicas (forma de tratamento e entrada de dados da curva de retenção), além das possibilidades numéricas referentes ao pós-tratamento. A plataforma Hydrus foi adotada neste trabalho devido a possibilidade de avaliação do fluxo não saturado mediante as condicionantes climáticas e inserção dos ajustes para consideração da curva de retenção. Este é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizado para análise de fluxo de água e transporte de soluto em meios porosos parcialmente saturados, possuindo como possibilidades de condição de contorno, diversas opções em termos de condições climáticas e geotécnicas. Na primeira, os dados de clima são utilizados conforme a disponibilidade dos mesmos em termos de precipitação, evapotranspiração, velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura do ar enquanto que em termos geotécnicos os dados são aqueles relacionados à granulometria, plasticidade, permeabilidade saturada e as características de retenção do material (curva de retenção). A plataforma permite a discretização do perfil em diferentes camadas onde os dados geotécnicos individuais são aqueles citados anteriormente. Informações de saída do modelo são aquelas relacionadas às variações da sucção e do teor de umidade ao longo do perfil. Ainda, a variação da permeabilidade ao longo do tempo em função das condicionantes climáticas pode ser também avaliada. Maiores informações podem ser obtidas em Simunek *et al.* (2005).

Dessa forma, este trabalho objetiva a avaliação da variação das frentes de infiltração de água e da pressão de sucção em um perfil estrutural de uma via férrea considerando-se as condições climáticas e geotécnicas não saturadas dos materiais envolvidos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de obter as variações das respostas referentes ao fluxo em um perfil típico de uma via férrea, foram simulados cenários relacionados às diferentes épocas do ano, considerando os seus devidos aspectos climáticos. Os materiais geotécnicos considerados foram àqueles normalmente utilizados como sublastro e subleito de uma via férrea. Estes foram coletados em uma via férrea na região de Piaçaguera (SP), composta de lastro, sublastro e subleito de bitola larga (1600 mm) localizada próxima à cidade de Cubatão (SP). Quanto ao lastro, este não foi alvo do estudo devido a sua não capacidade de reter água em função do tamanho dos grãos e inerentes vazios, salvo na condição de colmatado onde este material potencialmente teria capacidade de retenção de água. Os materiais de sublastro e subleito foram coletados e levados ao laboratório para serem submetidos aos ensaios de caracterização (granulometria, plasticidade, compactação). A Tabela 1 mostra os resultados dos ensaios laboratoriais realizados.

Tabela 1: Características geotécnicas dos materiais estudados

Material	LL (%)	LP (%)	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	w _{ot} (%)	G _s (g/cm)	HRB	SUCS	MCT
Subleito	32,8	28,5	6	29	53	12	1,670	18,1	2,68	A-4	ML or OL	NS'/NA'
Sublastro	-	-	66	34	-	-	2,169	6,5	2,64	-	-	-

4.1 Condições geotécnicas quanto à retenção de água

Em relação ao sublastro, baseados nos valores da granulometria e o Limite de Liquidez (LL), a curva de retenção foi determinada por meio do modelo de Aubertin *et al.* (2003), baseado no modelo de Kovács (1981) por meio da plataforma numérica Seep/W, especificamente utilizado para modelagem de fluxo não saturado. Para isto, utilizou-se o valor de D_{10} (diâmetro a permitir passar 10% do material), C_u (Coeficiente de Uniformidade, sendo D_{60}/D_{10}) retirados da curva granulométrica, além do LL (Limite de Liquidez). A determinação da curva foi realizada a partir de uma função cumulativa de distribuição de tamanho dos poros. O conjunto de equações é dado em conjunto com relações desenvolvidas para aplicações específicas em materiais granulares e solos coesos (argilosos). O método é um meio prático para estimar a curva de retenção a partir de propriedades geotécnicas básicas e utiliza o valor de uma ascensão capilar equivalente em um solo acima do nível d'água como parâmetro de referência para definir a relação entre o teor de umidade e a sucção. Maiores informações a respeito do método e equações pode ser obtida em Aubertin *et al.* (2003).

No que concerne ao subleito, determinou-se a curva de retenção em laboratório a partir da utilização de dois sensores de sucção do tipo Watermark inseridos no topo e na base do corpo de prova compactado dentro do cilindro de Proctor. A compactação do material de solo foi realizada nas condições de umidade ótima e densidade máxima (Tabela 1). A Figura 4 apresenta o esquema de moldagem e o posicionamento dos sensores no referido solo. Assim, foram realizadas medidas de sucção na medida em que o solo era deixado a perder umidade, tendo esta controlada e determinada por meio de índices físicos.

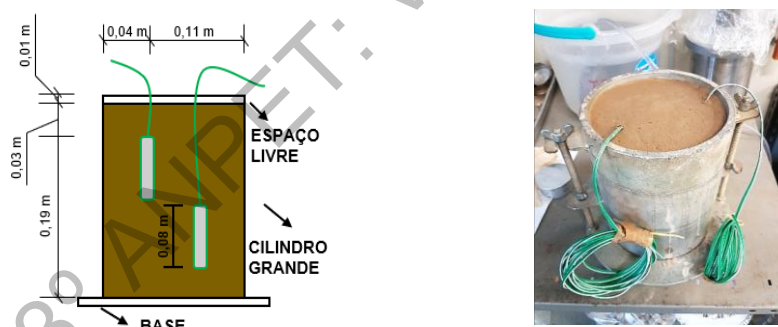


Figura 4: Localização dos sensores nos corpo de prova para obtenção da curva de retenção.

Além da utilização dos sensores de sucção foram utilizados ainda os procedimentos referentes ao método do papel filtro no mesmo corpo de prova. O papel filtro é utilizado como um “sensor” de forma a ter a sua umidade em equilíbrio com a mesma do solo quando em contato com aquele após cerca de 7 dias. Esta umidade é relacionada a um valor de sucção por meio de uma curva de calibração do papel filtro. Assim, pode-se plotar valores de coordenadas referentes às sucções e diferentes umidades obtidas em diferentes condições na medida em que o corpo de prova perde umidade. Maiores informações a respeito do método podem ser obtidas por meio da normativa ASTM D5298-16. A Figura 5 mostra as curvas de retenção obtidas de acordo com os métodos citados. A curva do material do subleito é apresentada ajustada e com resultados dos dois métodos que foram utilizadas em complementariedade.

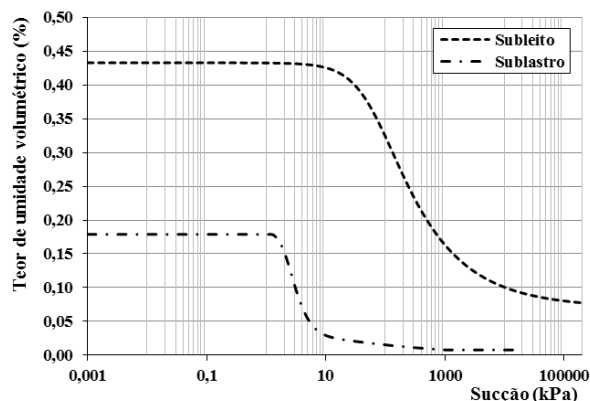


Figura 5: Curvas de retenção de água para o sublastro e subleito estudados.

4.2 Condições de contorno climáticas

Quanto ao clima utilizado nas simulações numéricas, foram considerados os valores de precipitação e evaporação dos anos 2017 e 2018 obtidos junto a REDEMET (Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica), estação da Base Aérea de Santos (SP), estando localizada na cidade do Guarujá, a cerca de 30 km do local da via onde foram coletados os materiais (coordenadas geográficas, 23°55'30''S/46°17'15''W). A Figura 6 mostra os valores referentes à precipitação e evaporação ao longo referente aos anos de 2017 e 2018.

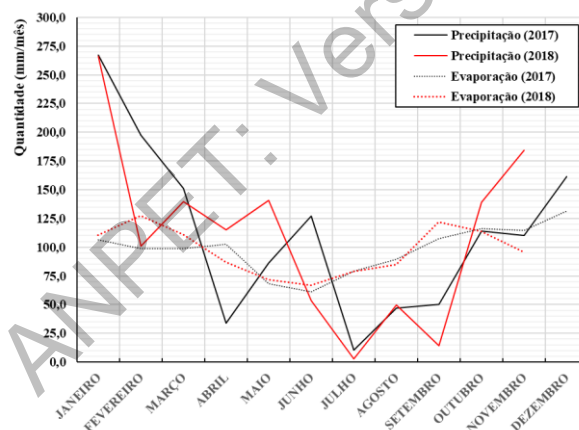


Figura 6: Valores de precipitação e evaporação em 2017 e 2018 na região de Piaçaguera.

A partir dos valores, observa-se em ambos os anos avaliados um superávit hídrico (precipitação maior do que evaporação) similar no mês de janeiro de cerca de 160 mm. Por outro lado, também em ambos os casos, observa-se um déficit hídrico (evaporação maior do que evaporação) da ordem de 70 mm no mês de julho. Entretanto, atenta-se ao mês de setembro, onde foram verificados valores de déficit hídrico de, respectivamente, 105 mm e 68 mm referentes aos anos de 2017 e 2018. Os dados mostram períodos de superávit hídrico, aproximadamente entre os meses de outubro e maio enquanto que no subsequente período, entre os meses de junho e setembro, observa-se a ocorrência de déficit hídrico. Dessa forma, nas avaliações numéricas foram simulados os dois cenários mais críticos por meio dos valores de precipitação e evaporação referentes aos meses de maior superávit e déficit hídrico, janeiro e julho, respectivamente. A escolha do mês de julho foi devido ao déficit hídrico similar observado em ambos os anos avaliados, ao contrário do mês de setembro que, mesmo apresentando um valor maior de déficit no ano de 2018, apresentou também um valor 50%

menor no ano de 2017. Ainda, constatou-se que em outros anos anteriores àqueles desta análise, o mês de julho normalmente apresenta os maiores valores de déficit hídrico anual. As Figuras 7(a) e 7 (b) apresentam os valores de precipitação e evaporação diários médios (2017 e 2018) utilizados respectivamente, nos cenários hídricos 1 (superávit, mês de janeiro) e 2 (déficit, mês de julho) na etapa de modelagem numérica. A designação de superávit hídrico em relação ao cenário 1 (janeiro) decorre da somatório dos valores de precipitação ao longo do mês ser maior do que a evaporação, mesmo que ocorram alguns dias em que evaporações são maiores do que as precipitações. O mesmo corre com a designação de déficit hídrico para o caso 2 (julho), onde existem dias em que a precipitação é maior do que a evaporação.

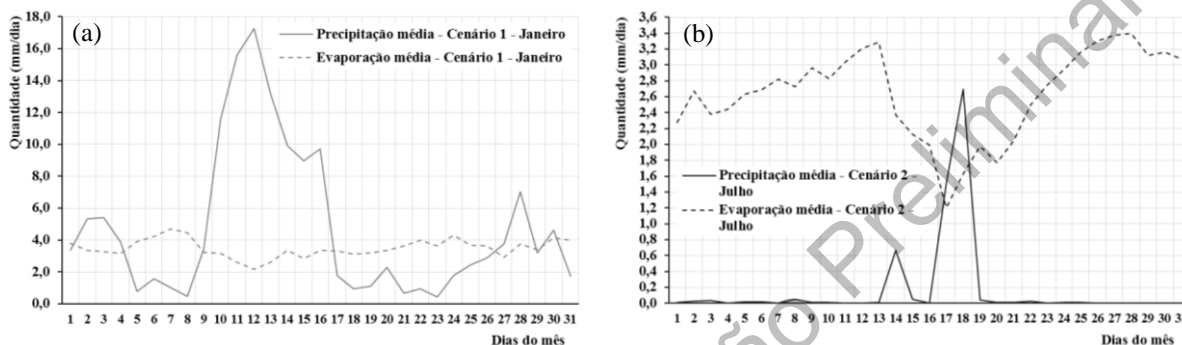


Figura 7: Valores de transpiração e evaporação considerados nas simulações numéricas nos cenários 1 (a) e 2 (b).

4.3 Plataforma numérica

No presente trabalho, foram simulados numericamente por meio do Hydrus dois diferentes cenários, sendo o cenário 1 composto por uma camada de sublastro de 20 cm sobre o substrato (subleito) mediante um cenário de superávit hídrico (mês de janeiro), enquanto que o cenário 2 refere-se ao mesmo perfil mediante um cenário de déficit hídrico (mês de julho). A camada de lastro não foi contemplada neste modelo por esta não possuir características de retenção e dessa forma, considerou-se que toda a entrada e saída de água ocorreriam a partir da camada de sublastro. As características geotécnicas do sublastro e do subleito referem-se àquelas indicadas na tabela 1 e Figura 5 enquanto que os valores das condicionantes climáticas referem-se àqueles apresentados nas Figuras 7(a) e 7(b).

Nos cálculos numéricos, o modelo das propriedades hidráulicas adotado foi o de Van Genuchten (1980), sem considerar o fenômeno de histerese. Quanto às condições de contorno geométricas, a condição superior foi de fluxo não saturado mediante as condições determinadas em um balanço hídrico superficial determinado a partir dos dados de precipitação e evaporação. No que se refere à condição inferior, foi determinado a condição de drenagem livre (*free drainage*), sem impedimento para fluxo vertical e sem consideração de Nível de Água (N.A.) próximo. No que se referem às condições iniciais, os materiais foram considerados como compactados na umidade próxima da ótima determinada a partir do ensaio de Proctor (Tabela 1). Tal situação foi alcançada a partir da imposição de um valor de sucção referente ao teor de umidade correspondente ao teor ótimo de compactação no caso do subleito. Para o sublastro, a sucção considerada foi àquela referente ao teor de umidade de cerca de 3% (valor médio medido em campo em condições pós-construção). Esta relação pode ser vista por meio das curvas de retenção de água de cada material (Figura 5). Assim, no caso do subleito, a sucção considerada foi de 500 kPa enquanto que no sublastro, 10 kPa.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS DOS CENÁRIOS SIMULADOS

A partir das condicionantes geométricas, geotécnicas e climáticas referentes a uma seção da via férrea próxima da cidade de Piaçaguera (SP), foram simulados numericamente através do Hydrus os dois cenários citados anteriormente. Os resultados foram obtidos em termos da variação das tensões de sucção e do teor de umidade volumétrica ao longo do perfil da via férrea. As Figuras 8(a) e 8(b) mostram as variações das tensões de sucção e do teor de umidade volumétrica ao longo do perfil avaliado considerando o cenário 1 (superávit hídrico). Os valores referentes às indicações T0, T1, T2, T3, T4, T5 e T6 referem-se respectivamente à condição inicial da simulação e a 5, 10, 15, 20, 25 e 31 dias após o início da mesma.

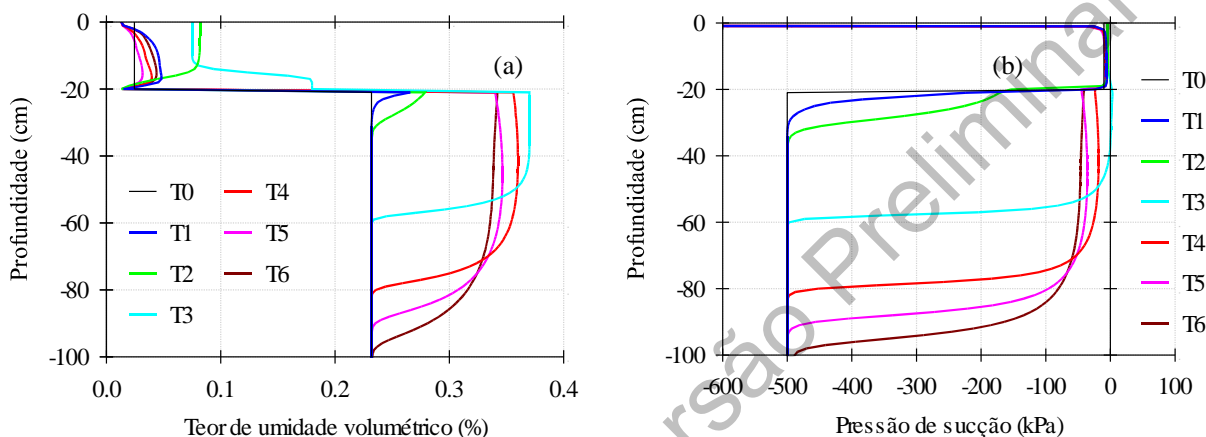


Figura 8: Variação dos valores de sucção (a) e teor de umidade volumétrico (b) ao longo do perfil considerando o mês com superávit hídrico (cenário 1) no perfil de via férrea avaliado.

A partir da Figura 8, observa-se a evolução da frente de infiltração ao longo do perfil. Na camada de sublastro, a variação dos valores dos teores de umidade mostrou-se a partir do teor de umidade inicial ($\approx 2,5\%$) até aproximadamente 18% em função das ocorrências climáticas ao longo dos 31 dias da simulação. Na camada de subleito, ao longo do tempo, foi observado um avanço da frente de infiltração, com o aumento do teor de umidade em profundidade na medida em que o aporte hídrico ao longo dos dias foi sendo submetido. Observa-se ainda que nas condições contempladas pelo cenário 1, somente após a profundidade de 1 metro o material do subleito não teria uma variação do teor de umidade. Os resultados mostraram a relevante influência das condições climáticas na variação do teor de umidade especialmente nos primeiros centímetros do subleito.

A respeito das tensões de sucção, observa-se uma variação das mesmas na medida em que os teores de umidade variam em ambas as camadas. Os valores se aproximam de 0 nas partes mais superficiais da camada do subleito (mais úmido), diminuindo na medida em que o teor de umidade decresce em profundidade.

A Figura 9(a) e 9(b) mostra a variação da tensão de sucção e do teor de umidade volumétrica ao longo do perfil avaliado considerando o cenário 2 em que há déficit hídrico.

Em geral, os resultados mostram um progresso bem menor da frente de infiltração no caso de um cenário com déficit hídrico devido ao menor aporte de água proveniente do balanço hídrico composto pelo teor de umidade existente e as ocorrências de precipitação/evaporação. Na camada de sublastro houve uma baixa variação do teor de umidade, que permaneceu

próximo a 2,5 % (valor inicial) enquanto que no subleito, a frente de infiltração observada pouco avançou (cerca de 40 cm) a partir do início da simulação até o fim do mês.

Quanto às tensões de sucção, estas variaram pouco na camada de sublastro em consoante à pouca variação do teor de umidade. Entretanto, no subleito, estas tensões não sofreram variações abaixo de 40 cm, permanecendo com os valores iniciais. Na porção do solo mais superficial, onde ocorreram variações das tensões de sucção, estas diminuíram ao longo dos dias da simulação em função do aumento do teor de umidade verificado neste período.

Em geral, verificou-se que durante na época mais chuvosa (verão), o perfil de via simulado apresenta uma maior propensão a ter as características mecânicas menos preservadas a partir da condição inicial em comparação com a época do inverno em que o aporte de água existente manteve grande parte da camada com os valores de teor de umidade e sucção iniciais. Entretanto, ressalta-se que os primeiros 40 cm do subleito sofreram impacto hídrico em ambos os casos, mesmo que de forma menos proeminente.

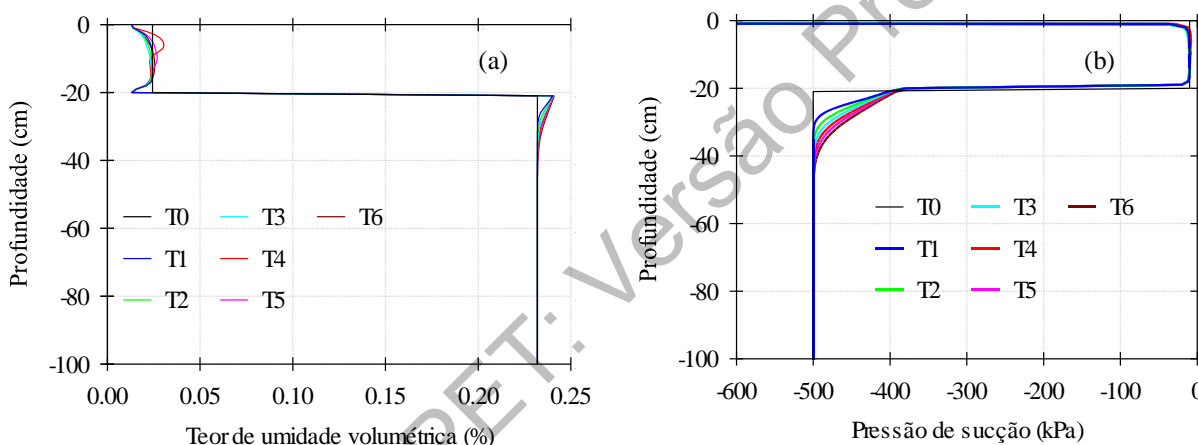


Figura 9: Variação dos valores do teor de umidade volumétrico (a) e da sucção (b) ao longo do perfil considerando o mês com déficit hídrico (cenário 2) no perfil de via férrea avaliado.

6. CONCLUSÕES

De forma geral, pôde-se afirmar que para os cenários simulados, os resultados evidenciaram a significativa influência das condicionantes climáticas nos processos de percolação e desenvolvimento das frentes de infiltração. A avaliação considerando o fluxo não saturado permitiu a determinação da dinâmica da água em termos de variação dos teores de umidade e consequentemente da sucção em profundidade nos perfis ao longo do tempo.

Em relação ao sublastro, este obteve uma maior variação do teor de umidade durante o período com excedente hídrico devido ao aporte de água disponível. Variações excepcionais com aumento de 2 a 3 vezes o valor inicial foram ocasionadas por ocorrências maiores de aportes hídricos em certos dias do mês simulado. No período de déficit hídrico, as variações de teor de umidade foram, como esperado, sensivelmente menores. No que concerne ao subleito, durante o mês de janeiro (excedente hídrico), a frente de infiltração atingiu a profundidade de cerca de 1 metro, tendo um forte impacto em termos de aumento de teor de umidade nas porções mais superficiais. Por outro lado, durante o mês de julho (déficit hídrico), a frente de infiltração atingiu uma profundidade máxima de 41 cm com pouco impacto em termos de aumento de teor de umidade nas partes mais superficiais do subleito.

Em relação às tensões de sucção, estas variaram mais durante o período de excedente hídrico devido ao maior aporte de água resultante do balanço hídrico superficial entre os valores de precipitação e evaporação considerados.

Os níveis de grandeza de teor de umidade e sucção dos materiais foram diferentes devido às características distintas dos materiais em termos de retenção de água evidenciadas pelas curvas de retenção obtidas e que serviram como dados de entrada do modelo numérico.

Conclui-se ainda que conforme a abordagem não saturada, a pressão de sucção é associada ao comportamento hidromecânico das camadas geotécnicas. Sendo assim, a maior variação da mesma infere em uma possível maior variação dos parâmetros de resistência e deformabilidade das camadas, o que pode vir a causar, dentre outros, maiores níveis de deformação dos materiais e valores de perda da qualidade geométrica das vias férreas.

O conhecimento e a busca por materiais que sejam menos susceptíveis à variação do teor de umidade e a tensão de sucção devem ser considerados a fim de que, na medida do possível, possam ser utilizados almejando obter uma camada compactada mais homogênea no que se refere às variações das características mecânicas ao longo do tempo de operação da via férrea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aubertin, M; Bonimpa e B. Bussiére e R.P. Chapuis (2003) *A Model to Predict the Water Retention Curve From Basic Geotechnical Properties*. Canadian Geotechnical Journal, 40 (6): 1104 – 1122.
- ASTM D5298-16 (2016) *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*. American Society of Testing Materials.
- Blight, G.E. (1997) *Interactions Between the Atmosphere and the Earth*. International Journal of Soil Mechanics – Géotechnique vol. 47, Nº 4, p. 715 – 767.
- Camacho, J. (2002) *Peculiaridades de Distribuição de Umidades em Bases de Pavimento de Solo Arenoso Fino Laterítico*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 237p.
- Castro, G. (2019) *Avaliação da Influência das Condições Geotécnicas e Climáticas no Comportamento Hidromecânico de um Subleito Ferroviário*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 183 p.
- Crony, D. (1952) *The Movement and Distribution of Water in Soils*. Géotechnique Vol. III, Nº I, p. 1-16.
- Dunne, T. e L.P. LEOPOLD, L.B. (1995) *Water in Soil*. In: “Water in Environmental Planning.” W.H. Freeman and Company, New York, 818p.
- Fredlund , D.G. e H. Rahardjo (1993) *Soil Mechanics For Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons – Science Publications, 517p.
- Freeze, R.A. e J.A. CHERRY, J.A. (1979) *Groundwater* Prentice – Hall Inc. Englewood Cliffs, 604p.
- Houston, W.N. e S.L. Houston (1995) *Infiltration Studies for Unsaturated Soils*. Unsaturated Soils, Recife, Brazil, Anais, p. 869-875.
- Kovacs, G. (1981) *Seepage Hydraulics*. Developments in Water Science 10. Elsevier Scientific Publishing Co. Amsterdam. Oxford. New York.
- Lopes, L. S. (2017) *Análise Experimental do Comportamento Hidráulico e Mecânico do Pavimento Ferroviário*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Marinho, F.A.M. (1997) *Medição de Sucção em Solos*. N°SAT - 3º Simpósio Brasileiro de solos não saturados, Rio de Janeiro, vol. 2, Anais, p. 373-397.
- Miyazaki T. (1993) *Water Flow in Soils*. New York, Ed. Marcel Dekker, 296p.
- Rohm, S. A. (1997) *Solos não Saturados*. Monografia Geotécnica Nº 4 , Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Departamento de Geotecnia, 135p.
- Stuermer, M. M. (1998) *Estudo da Capacidade de Retenção de Água em um Solo Residual Compactado*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 122 p.
- Simunek, M. (2005) *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media – Verson 3.0*. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, California, 270 p.