

Uma Proposta para Obtenção Experimental dos Parâmetros do Modelo Básico de Barcelona para Solos Não Saturados

A Proposal for Experimental Determination of the Barcelona Basic Model Parameters for Unsaturated Soils

Ammanda Aragão Abreu  & Francisco Chagas da Silva Filho 

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, CE, Brasil

E-mails: ammanda02@gmail.com; fchagas@ufc.br

Resumo

Nas últimas décadas, ocorreu um avanço significativo das investigações experimentais em solos não saturados, principalmente devido ao desenvolvimento de técnicas de laboratório que permitiram a reprodução da condição não saturada observada em campo, possibilitando a realização de ensaios com controle e medição de sucção. Estas técnicas viabilizaram a elaboração de diversos modelos constitutivos para solos não saturados, como por exemplo o Modelo Básico de Barcelona (BBM), que usa conceitos de plasticidade e de estados críticos. No entanto, normalmente, a aplicação prática destas técnicas de laboratório e a consequente obtenção dos parâmetros dos modelos constitutivos requerem equipamentos sofisticados, muitas vezes indisponíveis nos laboratórios de mecânica dos solos. Neste contexto, o estudo apresentado neste artigo visa propor uma metodologia de obtenção dos parâmetros do modelo BBM através da realização de ensaios de laboratório simplificados, sem a realização do controle da sucção. Os parâmetros estimados através dessa metodologia foram validados em uma simulação numérica realizada no programa de elementos finitos CODE_BRIGHT. De modo geral, o comportamento do solo simulado apresentou bom ajuste com o comportamento experimental, indicando que a metodologia idealizada apresentou resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Ensaios de laboratório; BBM; CODE_BRIGHT

Abstract

In the last decades, there has been a significant advance in experimental investigations in unsaturated soils, mainly due to the development of laboratory techniques that allow a reproduction of the unsaturated condition observed in the field, making it possible to carry out tests with control and measurement of suction. These techniques made it possible to obtain several constitutive models for unsaturated soils, such as the Barcelona Basic Model (BBM), which uses the concepts of plasticity and critical states. However, normally, the practical application of the laboratory and the consequent obtaining of the constitutive models parameters require sophisticated equipments, often unavailable in soil mechanics laboratories. In this context, the study presented in this article aims to propose a methodology for obtaining the BBM model parameters by performing simplified laboratory tests, without the control of suction. The parameters estimated through this methodology were validated in a numerical simulation performed by using the CODE_BRIGHT software which is based on the finite element method. In general, the behavior of the simulated soil presented a good fit with the experimental behavior, indicating that the idealized methodology presents satisfactory results.

Keywords: Laboratory tests; BBM; CODE_BRIGHT

1 Introdução

Nas últimas décadas, o estudo envolvendo o comportamento dos solos não saturados evoluiu com o intuito de contribuir para a melhoria dos projetos e construções, tendo em vista que a condição não saturada dos solos está presente durante toda a vida útil de uma grande variedade de obras geotécnicas (Vilar 2004).

Dessa forma foram desenvolvidas técnicas de laboratório que permitiram a reprodução do comportamento dos solos não saturados observado em campo, o que viabilizou a elaboração de diversos modelos constitutivos, podendo citar como pioneiros os trabalhos de Bishop (1959); Fredlund et al. (1978); e Matyas & Radhakrishna (1968).

Os modelos constitutivos para solos não saturados possuem como objetivo expressar o comportamento mecânico e hidráulico do solo quando este é submetido a variações do seu estado de tensão e do seu grau de saturação, representando assim a variação da sua deformabilidade e da sua resistência com a sucção (Cordão Neto 2005). Dependendo do solo, características como colapso e expansão devem ser consideradas, de modo que a escolha do modelo constitutivo deve ser baseada no comportamento do solo obtido por meio de ensaios de campo ou de laboratório (Camapum de Carvalho et al. 2015).

Um dos modelos constitutivos com grande aceitação para os solos não saturados é o Modelo Básico de Barcelona (BBM) proposto por Alonso et al. (1990), desenvolvido com base em resultados de ensaios triaxiais com sucção controlada utilizando caulinitas e argilas arenosas. O modelo BBM se baseia nos conceitos da teoria da plasticidade e do estado crítico, consistindo em uma extensão do modelo Cam-Clay modificado para solos não saturados.

A aplicação prática do modelo BBM, assim como de outros modelos para solos não saturados, necessita da determinação de parâmetros através da realização de ensaios com sucção controlada. Estes tipos de ensaios requerem equipamentos sofisticados muitas vezes indisponíveis nos laboratórios de mecânica dos solos, o que dificulta a utilização destes modelos. Como alternativa aos ensaios com sucção controlada, Miranda (1988) sugeriu a realização de ensaios de laboratório simplificados, nos quais a sucção do solo é estimada através da sua curva de retenção de água.

Neste contexto, utilizando a proposta de Miranda (1988), o estudo apresentado neste artigo busca propor uma metodologia de determinação dos parâmetros do modelo BBM através de ensaios de laboratório convencionais: ensaio de cisalhamento direto, adensamento edométrico e papel filtro. A metodologia idealizada será aplicada para uma areia argilosa e os parâmetros estimados por meio dela serão avaliados a partir da realização de uma

simulação numérica no programa de elementos finitos CODE_BRIGTH (versão 9), desenvolvido por Olivella et al. (1994) para solucionar problemas com acoplamento hidromecânico.

2 Modelo Básico de Barcelona (BBM)

O modelo BBM usa conceitos da teoria da plasticidade com endurecimento hidrostático para solos não saturados, sendo definido no espaço (p, q, s) em que p é a tensão média líquida, q é a tensão desvio e s é a sucção mátrica. Alonso et al. (1990), ao analisarem o comportamento dos solos não saturados submetidos à compressão isotrópica com sucção controlada, definiram no plano (p, s) uma região elástica limitada por duas curvas de plastificação: LC (*loading collapse*) e SI (*suction increase*).

A curva LC, definida pela Equação 1, considera que o escoamento pode ser realizado por trajetórias com o aumento da tensão p ou por diminuição da sucção s .

$$\left(\frac{p_0(s)}{p^c}\right) = \left(\frac{p_0(0)}{p^c}\right)^{[(0)-] / [(s)-]} \quad (1)$$

Onde p^c é a tensão de referência, $p_0(s)$ é a tensão de pré-adensamento do solo não saturado com uma determinada sucção, $p_0(0)$ corresponde a tensão de pré-adensamento do solo saturado, $\lambda(s)$ é o índice de compressibilidade da parte virgem do carregamento de um solo com uma dada sucção, $\lambda(0)$ é o índice de compressibilidade da parte virgem do carregamento de um solo saturado e κ é o índice de compressibilidade na descarga-recarga dos solos não saturados (considerado por Alonso et al. (1990) como um parâmetro que independe da sucção).

Alonso et al. (1990) propuseram também, na definição da LC, que a rigidez do solo aumenta com a sucção. No entanto, a fim de evitar este aumento ocorra de forma ilimitada, os autores propuseram a incorporação de uma rigidez anisotrópica máxima, que consiste em um índice de compressibilidade elastoplástico assintótico calculado pela Equação 2.

$$(s) = (0) \left[(1-r) e^{-s} + r \right] \quad (2)$$

Onde β é o parâmetro que controla o aumento da rigidez do solo com a sucção e r é a constante relacionada com a rigidez máxima do solo (dada pela Equação 3).

$$r = \frac{(s \rightarrow \infty)}{(0)} \quad (3)$$

Sabendo que o solo pode apresentar deformações plásticas decorrentes apenas do aumento da sucção, Alonso et al. (1990) propuseram em seu modelo a curva

de escoamento SI, definida pela Equação 4. Segundo os autores, sempre que o solo atingir um valor igual ao máximo valor de sucção previamente atingido, deformações plásticas serão geradas.

$$S = S_0 \tag{4}$$

Onde s_0 é a máxima sucção experimentalada pelo solo (sucção de plastificação);

A determinação das deformações elásticas e plásticas depende da trajetória considerada. Ou seja, qualquer trajetória que ocorra dentro da superfície de plastificação é considerada elástica e produz deformações completamente reversíveis. Caso a trajetória acione as superfícies LC e SI em qualquer direção, ocorre a plastificação com deformações elastoplásticas.

Ao analisar o comportamento do solo não saturado quando submetido a um estado de tensões triaxiais, Alonso et al. (1990) usaram a tensão desvio q para incluir o efeito das tensões cisalhantes. Dessa forma, para o estado de tensões triaxiais, o modelo BBM propõe que a superfície de escoamento apresente um aspecto tridimensional em formato de elipse no espaço (p, q, s) . Segundo os autores, para cada sucção existe uma elipse, semelhante ao utilizado

no modelo Cam-Clay Modificado, e o crescimento da superfície elíptica pode ocorrer por aumento da tensão de escoamento e aumento do efeito coesivo da sucção. A Equação 5 descreve a superfície de escoamento elíptica definida no espaço (p, q, s) .

$$q^2 = M^2 (p + p_s)(p_0 - p) = 0 \tag{5}$$

Sendo que:

$$p = -p_s = -ks \tag{6}$$

Onde q é a tensão desviadora, k é a constante que descreve o aumento da coesão com o aumento da sucção e M é a inclinação da linha de estados críticos, calculada pela Equação 7, independente da sucção.

$$M = \frac{6sen'}{3 - sen'} \tag{7}$$

A Figura 1 apresenta a superfície tridimensional no espaço (p, q, s) e as suas projeções nos planos (p, q) e (p, s) . A projeção no plano (p, q) tem um formato elíptico, sendo esta elipse tanto maior quanto maior for a sucção.

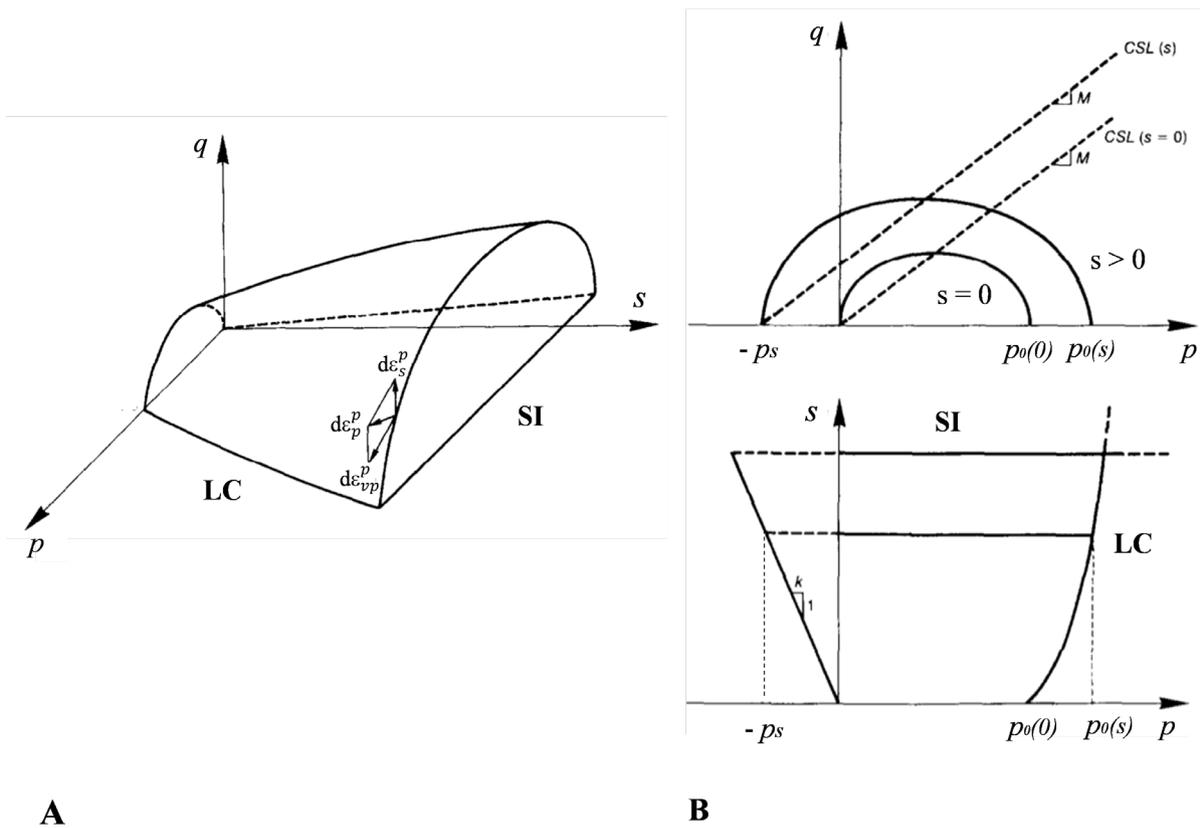


Figura 1 Superfície de plastificação proposta por Alonso et al. (1990): A. Vista 3D; B. Projeções nos planos (p, q) e (p, s) (Adaptado de Alonso et al. 1990)

3 Ensaios de Laboratório

O solo escolhido para a aplicação da metodologia proposta de obtenção dos parâmetros do modelo BBM foi uma areia argilosa classificada pelo sistema SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos) coletada na barragem Cipoada, localizada no município de Morada Nova no estado do Ceará. Optou-se por usar este tipo de solo por ele comumente ser utilizado na construção de barragens de terra homogêneas (exemplos de obras geotécnicas cujos comportamentos são consideravelmente influenciados pela não saturação do solo).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros geotécnicos deste solo obtidos através dos seguintes ensaios de caracterização: análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade, densidade real e compactação (energia Proctor Normal). Tais ensaios foram realizados seguindo as orientações das normas NBR 6457 (ABNT 2016a), NBR 6459 (ABNT 2016b), NBR 7180 (ABNT

2016c), NBR 7181 (ABNT 2016d), NBR 7182 (ABNT 2016e) e ME 093 (DNER 1994).

Tabela 1 Resumo dos parâmetros geotécnicos da amostra de solo ensaiada.

Parâmetro	Valor
Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	1,89
Umidade ótima (%)	12,6
Limite de liquidez (%)	27,8
Índice de plasticidade (%)	13,0
Densidade real	2,67
Classificação SUCS	SC

A Figura 2 e a Figura 3 apresentam, respectivamente, a curva de distribuição granulométrica e a curva de compactação do solo (energia Proctor Normal).

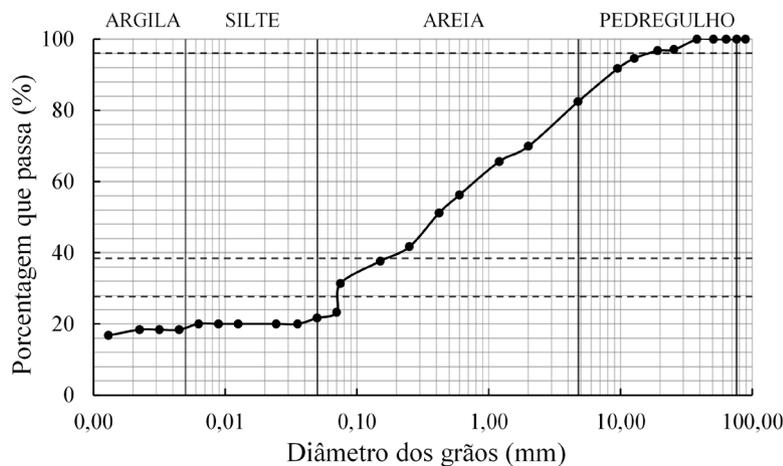


Figura 2 Curva de distribuição granulométrica.

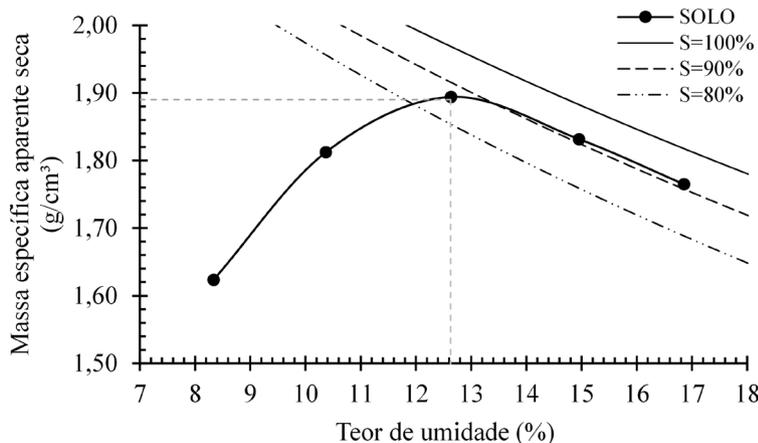


Figura 3 Curva de compactação do solo (energia Proctor Normal).

Para a estimativa dos parâmetros do modelo BBM foram realizados ensaios de cisalhamento direto e adensamento edométrico de forma simplificada, sem o controle da sucção. Esta simplificação consistiu na determinação da sucção das amostras ensaiadas através da curva de retenção de água no solo, obtida neste artigo através do ensaio de papel filtro.

3.1 Ensaio de Papel Filtro

O ensaio de papel filtro foi executado conforme a ASTM D5298/2016 (ASTM 2016). A curva de retenção de água no solo foi determinada através do processo de secagem e foi ajustada pelo modelo proposto por Fredlund & Xing (1994), conforme pode ser observado na Figura 4.

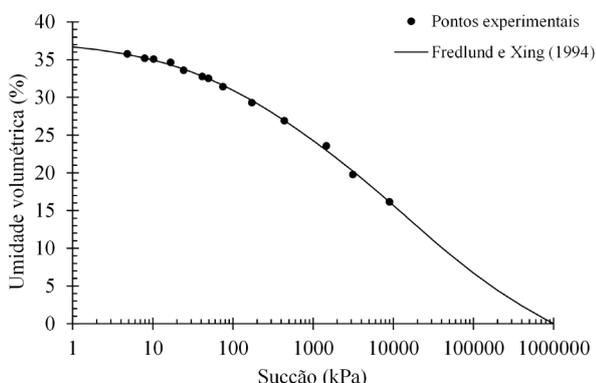


Figura 4 Curva de retenção de água no solo.

3.2 Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto foi executado conforme a norma ASTM D3080/1998 (ASTM 1998). Foram realizados 3 ensaios (1 inundado e 2 sem inundação) com o objetivo de obter os parâmetros de resistência do solo saturado (c' e ϕ') e não saturado (ϕ^b). Os corpos de prova (CPs) foram compactados na umidade ótima e foram ensaiados para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

Os parâmetros de resistência saturados, obtidos a partir da realização do ensaio inundado, estão apresentados na Tabela 2. Considerou-se nos ensaios que a inundação saturou o corpo de prova.

Tabela 2 Parâmetros de resistência do solo saturado.

ENSAIO	c' (kPa)	ϕ' (°)
Inundado	19,76	30,2

Os ensaios sem inundação foram realizados com corpos de prova em diferentes teores de umidade, com diferentes valores de sucção. O primeiro ensaio sem inundação foi realizado com os corpos de prova na umidade ótima, já o segundo foi realizado com CPs submetidos à secagem ao ar livre por 1 hora após a compactação. Todos os corpos de prova foram submetidos ao mesmo tempo de adensamento (2h), a fim de evitar grandes diferenças de perdas de umidade entre eles. Contudo, é importante ressaltar que nesse período os deslocamentos verticais estabilizaram para todos os CPs. Ao final de cada ensaio, foram determinadas as umidades dos corpos de prova e, a partir destas, estimadas as sucções por meio da curva de retenção de água apresentada anteriormente na Figura 4.

A Figura 5 apresenta as tensões cisalhantes máximas para diferentes valores de sucção resultantes dos ensaios realizados. Observa-se que para cada tensão normal, foi obtida uma reta cuja inclinação descreve o aumento da tensão cisalhante com o aumento da sucção. Neste artigo, ϕ^b foi adotado como a média das inclinações das retas apresentadas, obtendo-se um ϕ^b de 13,5°. É importante ressaltar que ϕ^b não é um parâmetro constante, pois varia em função da sucção atuante, o que consiste em outra limitação da estimativa realizada.

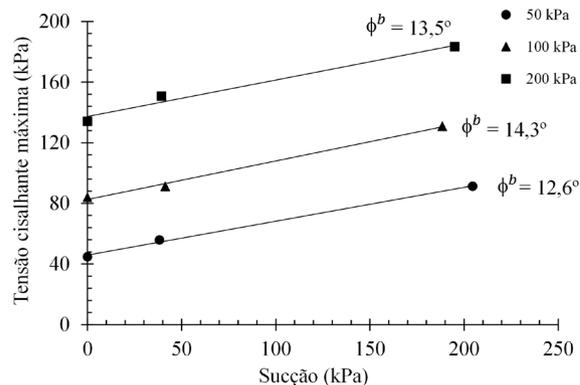


Figura 5 Tensões cisalhantes máximas para diferentes valores de sucção.

3.3 Ensaio de Adensamento Edométrico

O ensaio de adensamento edométrico foi executado com base na NBR 16853 (ABNT 2020). Foram realizados 5 ensaios, sendo 1 ensaio inundado e 4 ensaios sem inundação, a fim de se obter a curva de adensamento do solo para diferentes teores de umidade. Os 5 corpos de prova foram compactados manualmente na umidade ótima e foram submetidos aos carregamentos de 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 800 kPa.

No ensaio inundado, a inundação ocorreu antes da aplicação da primeira carga e o corpo de prova ficou submetido à saturação por 24 horas. Nos ensaios sem inundação, após a compactação na umidade ótima, os corpos de prova foram expostos ao ar livre para secarem e atingirem teores de umidade mais baixos e, conseqüentemente, sucções mais altas. O primeiro corpo de prova foi ensaiado sem tempo de secagem, ou seja, próximo à umidade ótima. Já o segundo CP foi submetido a 1 hora de secagem, o terceiro a 2 horas e o quarto a 2 horas e 30 minutos.

Diferente do ensaio de cisalhamento direto, em que se tem um corpo de prova para cada tensão normal, no ensaio de adensamento edométrico tem-se um único CP submetido a vários carregamentos. Tal fato faz com que a medição da umidade do corpo de prova apenas ao final do ensaio de adensamento não represente bem a umidade do CP ao longo de todos os carregamentos. Por isso, para cada corpo de prova ensaiado foi compactado um corpo de prova auxiliar de mesmas dimensões submetido ao mesmo tempo de secagem. No início de cada ensaio, foi medida a umidade do CP auxiliar e, ao final de cada ensaio, foi medida a umidade do CP ensaiado. Desse modo, o teor de umidade do solo considerado ao longo dos carregamentos foi a média das umidades calculadas. A Tabela 3 apresenta os teores de umidade dos corpos de prova auxiliares e dos ensaiados, bem como o teor médio adotado.

A Figura 6 apresenta as curvas de adensamento do solo obtidas através dos ensaios realizados. Assim como no ensaio de cisalhamento direto, foi considerado que o ensaio realizado com inundação promoveu a saturação do corpo de prova.

4 Estimativa dos Parâmetros do Modelo BBM

4.1 Metodologia Adotada

Para a obtenção dos parâmetros do modelo BBM, inicialmente as curvas de adensamento obtidas nos ensaios de adensamento edométrico foram reescritas em termos de

volume específico (v) e tensão p , calculados respectivamente pelas Equações 8 e 9.

$$v = 1 + e \quad (8)$$

$$p = \frac{(1 + 2k_0)_v}{3} \quad (9)$$

Onde e é o índice de vazios do solo, σ_v é a tensão vertical e k_0 é o coeficiente de empuxo no repouso, calculado neste trabalho pela fórmula de Jaky (1944).

A Figura 7 apresenta as curvas de adensamento do solo determinadas experimentalmente em termos da variação do volume específico v e da tensão p .

A Tabela 4 apresenta as tensões de pré-adensamento (p) e os parâmetros λ e κ para cada ensaio realizado, que correspondem respectivamente as inclinações das retas virgens e das retas de descompressão das curvas apresentadas na figura anterior. É importante ressaltar que o solo analisado foi compactado e, portanto, o processo de compactação induziu uma tensão de pré-adensamento ao solo.

Observa-se na Tabela 4 que as inclinações das retas de descompressão não sofreram alterações significativas com a variação da sucção, confirmando a proposta de Alonso et al. (1990) que diz que o parâmetro κ independe da sucção. Desse modo, neste trabalho será considerado o valor médio de 0,009 para κ .

As informações apresentadas na Tabela 4 foram utilizadas para a determinação da superfície LC do solo estudado, conforme pode ser observado na Figura 8. Os pontos experimentais foram ajustados através da Equação 1 proposta pelo modelo BBM.

Para o ajuste da LC, foi necessário determinar $\lambda(s)$ para variados valores de sucção. De acordo com a Equação 2, $\lambda(s)$ depende dos parâmetros $\lambda(0)$, β e r , os quais foram determinados neste artigo da seguinte forma: o parâmetro $\lambda(0)$ foi obtido experimentalmente, r foi estimado pela Equação 3 e β foi calculado por ajuste manual, de modo que a LC formulada pelo modelo BBM se aproximasse ao máximo dos pontos experimentais (como apresentado na Figura 8). A Figura 9 apresenta os λ obtidos experimentalmente e o ajuste realizado pelo modelo BBM.

Tabela 3 Teores de umidade dos corpos de prova dos ensaios de adensamento edométrico não inundados.

ESTADO DE SATURAÇÃO	TEOR DE UMIDADE (%)		
	CP AUXILIAR	CP ENSAIADO	TEOR MÉDIO
Não saturado	13,13	12,59	12,86
Não saturado	11,75	11,13	11,44
Não saturado	10,49	9,81	10,15
Não saturado	10,24	9,70	9,97

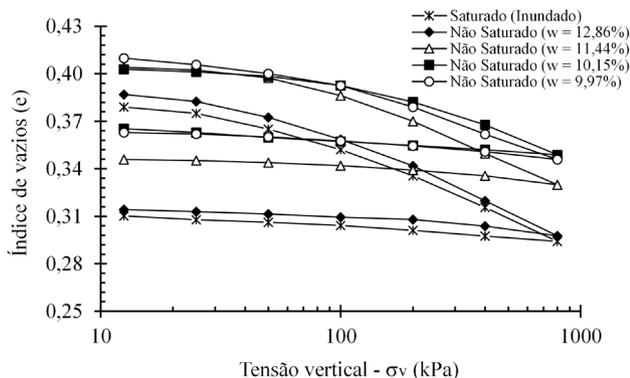


Figura 6 Curvas de adensamento do solo.

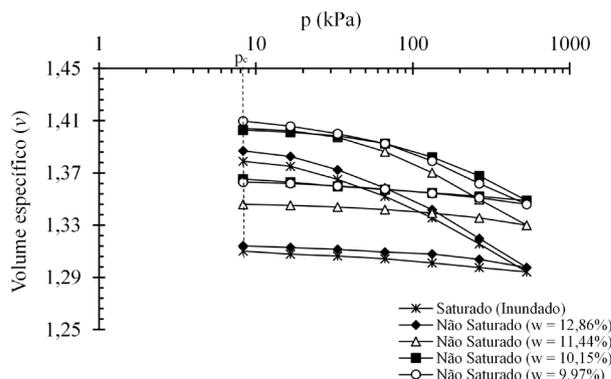


Figura 7 Volume específico versus Tensão p.

Tabela 4 Tensões de pré-adensamento, inclinações das retas virgens e das retas de descompressão.

ENSAIO	ESTADO DE SATURAÇÃO	UMIDADE (%)	SUCÇÃO (kPa)	p (kPa)	λ	κ
1	Saturado	100	-	42,5	0,069	0,0089
2	Não saturado	12,86	20,3	45,9	0,067	0,0092
3	Não saturado	11,44	107,3	53,8	0,062	0,0088
4	Não saturado	10,15	335,8	65,8	0,055	0,0091
5	Não saturado	9,97	389,2	66,5	0,055	0,0094

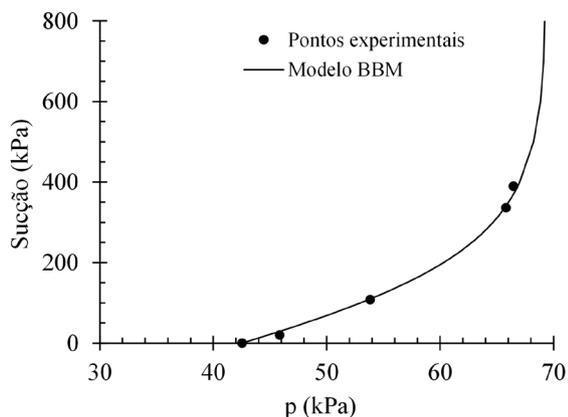


Figura 8 Superfície LC do solo da barragem Cipoadá.

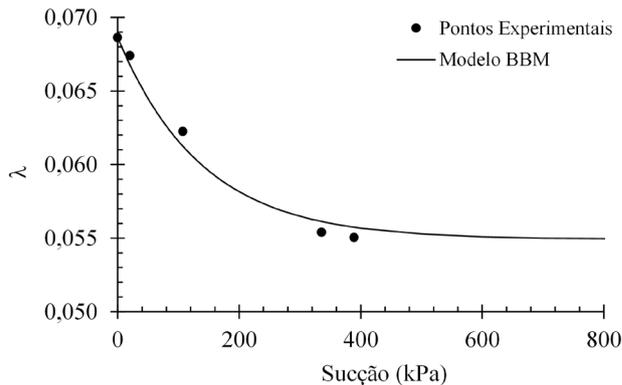


Figura 9 Variação de λ com a sucção.

Para a definição da superfície de plastificação elíptica proposta pelo modelo BBM, descrita pela Equação 5, fez-se necessário a determinação de p_s , que corresponde a intercessão de uma elipse com o eixo p devido ao aumento da sucção. A intercessão p_s é calculada pela Equação 6 e é função da constante k , que descreve o aumento da coesão

do solo com o aumento da sucção e que deve ser obtida a partir da realização de ensaios de compressão triaxial drenados para diferentes valores de sucção de forma controlada. Como alternativa à realização de ensaios com sucção controlada para determinação de k , foi utilizada a modificação proposta por Silva Filho (1998) para a determinação de p_s .

Na proposta de Silva Filho (1998), a intercessão de uma elipse com o eixo p para uma dada sucção é chamada de $\mu(s)$ e é função de M e de φ^b , podendo ser calculada pela Equação 10.

$$\mu(s) = M(s) \tan^b s \tag{10}$$

Onde μ é a intercessão da elipse com o eixo p para uma determinada sucção, M é a inclinação da linha de estados críticos, φ^b é o ângulo de atrito devido à sucção mátrica e s é a sucção mátrica.

A determinação da intercessão $\mu(s)$ por meio da Equação 10 possibilitou a estimativa da constante k e a definição da superfície de plastificação do solo analisado.

A Tabela 5 resume os parâmetros do modelo BBM estimados neste artigo e a Figura 10 apresenta as projeções

nos planos (p,q) e (p,s) da superfície de plastificação obtida pelo modelo.

Tabela 5 Parâmetros do modelo BBM.

Parâmetro	Valor
p^c (kPa)	8,3
$p_0(0)$ (kPa)	42,5
$\lambda(0)$	0,069
κ	0,009
r	0,8
β (MPa ⁻¹)	7,2
k	0,29
M	1,21

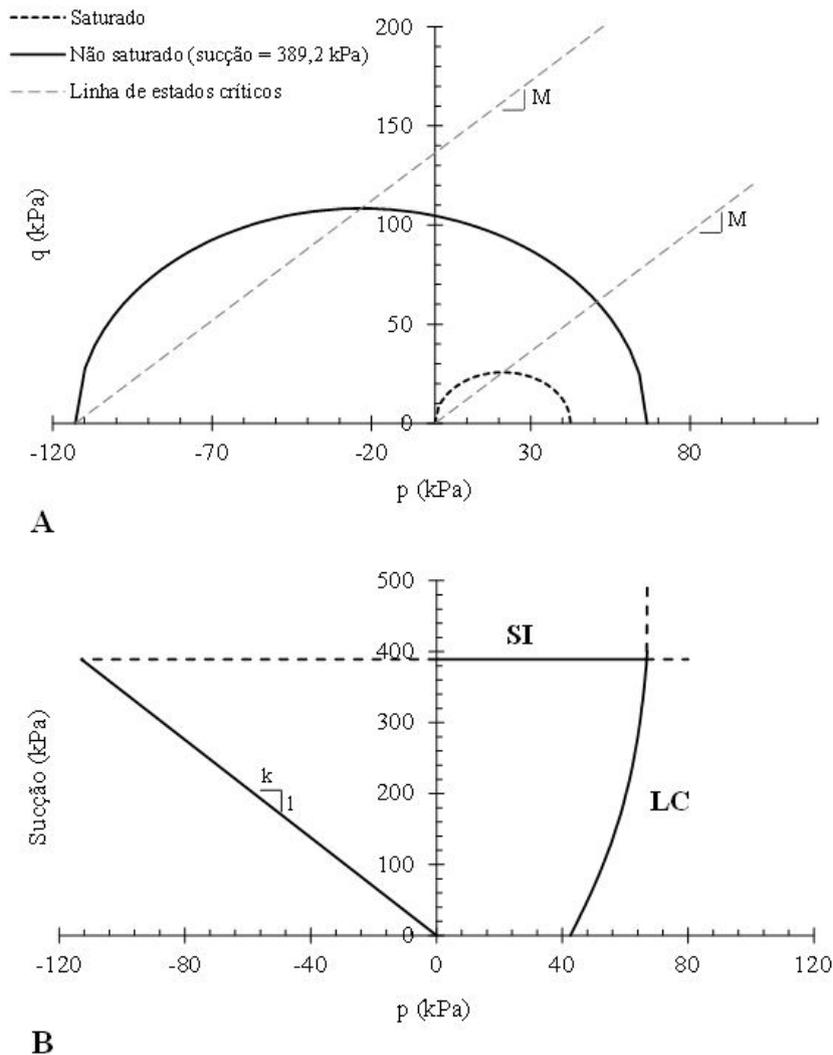


Figura 10 Superfície de plastificação obtida pelo modelo BBM: A. Projeção no plano (p,q) ; B. Projeção no plano (p,s) .

4.2 Validação dos Parâmetros

A fim de validar os parâmetros do modelo BBM estimados a partir da execução de ensaios simplificados, foi realizada a simulação numérica de um ensaio de adensamento edométrico no CODE_BRIGTH (versão 9). Nesta simulação, foram utilizadas as dimensões, o índice de vazios inicial e a sucção do corpo de prova do ensaio 2 (apresentado na Tabela 4).

O ensaio de adensamento edométrico foi simulado de forma particionada, considerando a variabilidade do módulo de elasticidade. Para cada carregamento aplicado na simulação, foi utilizado o módulo de elasticidade correspondente, calculado em função do módulo edométrico obtido experimentalmente para cada faixa de carregamento. A Figura 11 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e os da simulação numérica.

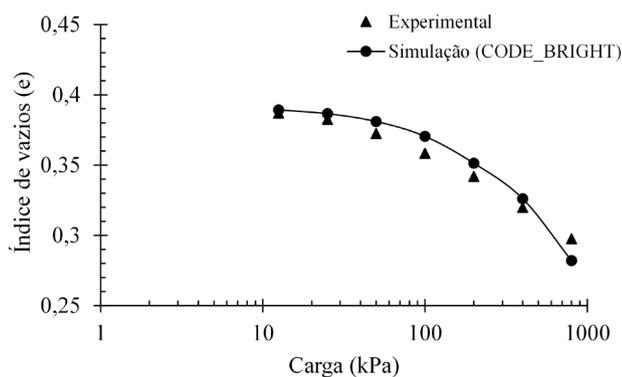


Figura 11 Comparação entre os resultados experimentais e os da simulação do ensaio de adensamento edométrico.

Observa-se na Figura 11 que os resultados da simulação diferiram pouco dos resultados experimentais, apresentando um erro quadrático médio de 0,0001. As pequenas diferenças apresentadas podem ser justificadas pela variação da sucção do solo ao longo do ensaio, já que ele foi realizado sem sucção controlada. Tendo em vista o bom ajuste obtido, pode-se validar os parâmetros estimados para o modelo BBM e considerar que os ensaios realizados sem sucção controlada, apesar das suas limitações, produziram resultados satisfatórios.

5 Conclusão

Este trabalho apresentou uma metodologia para obtenção dos parâmetros do modelo BBM utilizando ensaios

convencionais de laboratório sem sucção controlada, mas com estimativa a partir da curva de retenção de água no solo.

A simplificação proposta neste artigo apresentou como limitação o fato de as umidades das amostras ensaiadas não permanecerem constantes ao longo dos ensaios, devido a perda de umidade do solo por secagem. No entanto, apesar desta limitação, os parâmetros do modelo BBM determinados por meio desta metodologia forneceram resultados satisfatórios na simulação numérica realizada no CODE_BRIGTH, tendo em vista que o comportamento do solo simulado apresentou um bom ajuste com o comportamento experimental (erro quadrático médio de 0,0001).

De forma geral, pode-se concluir para o solo analisado que os resultados dos ensaios simplificados e a metodologia de obtenção dos parâmetros do modelo BBM forneceram resultados satisfatórios apesar das suas limitações.

6 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

7 Referências

- ABNT - vide Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Alonso, E.E., Gens, A. & Josa, A. 1990, 'A constitutive model for partially saturated soil', *Geotechnique*, vol. 40, no. 3, pp. 405-30. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.405>
- American Society for Testing and Materials 1998, 'ASTM D3080: Standard test method for direct shear test of soil under consolidated drained conditions', ASTM, USA.
- American Society for Testing and Materials 2016, 'ASTM D5298: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper', ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2016a, 'NBR 6457: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização', ABNT, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2016b, 'NBR 6459: Determinação do limite de liquidez', ABNT, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2016c, 'NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade', ABNT, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2016d, 'NBR 7181: Análise granulométrica', ABNT, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2016e, 'NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação', ABNT, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2020, 'NBR 16853: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional', ABNT, Rio de Janeiro.

- ASTM - vide American Society for Testing and Materials.
- Bishop, A.W. 1959, 'The principle of effective stress', *Teknisk Ukeblad*, vol. 106, no. 39, pp. 859-63.
- Camapum de Carvalho, J., Gitirana Junior, G. de F.N., Machado, S.L., Mascarenha, M.M. dos A. & Silva Filho, F.C. 2015, *Solos não saturados no Contexto Geotécnico*, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo.
- Cordão Neto, M.P. 2005, 'Análise hidromecânica de barragens de terra construídas com materiais colapsíveis', Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem 1994, 'ME 093/94 – Solos - Determinação da densidade real'.
- DNER - vide Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. & Widger, R.A. 1978, 'The shear strength of unsaturated soils', *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 313-21.
- Fredlund, D.G. & Xing, A. 1994, 'Equations for the soil water characteristic curve', *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 31, no. 4, pp. 521-32. <https://doi.org/10.1139/t94-061>
- Jaky, J. 1944, 'The coefficient of Earth pressure at rest', *Journal of society of Hungarian Architects and Engineers*, Budapest, Hungary, pp. 355-8.
- Matyas, E.L. & Radhakrishna, H.S. 1968, 'Volume change characteristics of partially saturated soils', *Géotechnique*, vol. 18, no. 4, pp. 432-48.
- Miranda, A.N. 1988, 'Behavior of Small Dams during Initial Filling', Tese de Doutorado, Colorado State University, Fort Collins.
- Olivella, S., Carrera, J., Gens, A. & Alonso, E.E. 1994, 'Non-isothermal Multiphase Flow of Brine and Gas through saline media', *Transport in Porous Media*, vol. 15, pp. 271-93. <https://doi.org/10.1007/BF00613282>
- Silva Filho, F.C. 1998, 'Análise numérica de problemas em solos não-saturados: modelagem, implementação e aplicações práticas', Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Vilar, O.M. 2004, 'Solos não saturados', *5º Simpósio Brasileiro de solos não saturados*, São Carlos, vol. 2.

Recebido em: 15/02/2021

Aprovado em: 07/06/2021

Como citar:

Abreu, A. & Silva Filho, F.C. 2021, 'Uma Proposta para Obtenção Experimental dos Parâmetros do Modelo Básico de Barcelona para Solos Não Saturados', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 41514. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_41514