

Capítulo 18

RECALQUES EM SOLOS NÃO SATURADOS COM BOLHAS DE AR OCLUSAS

Pedro Murrieta Santos Neto
Marcio de Souza Soares de Almeida

1. INTRODUÇÃO

No estudo das deformações de solos não saturados, deve-se ressaltar a importância da condição do ar nos vazios na compressibilidade desses solos:

- quando o ar está em forma contínua, o fluxo é controlado pela permeabilidade do ar nos vazios, o que faz com que as deformações ocorram rapidamente (Figura 1a). A diferença entre a pressão do ar e a da água, ($u_a - u_w$), convencionalmente chamada de sucção, pode atingir níveis baixíssimos, o que mantém a água fixa ao esqueleto sólido e tem influência decisiva no comportamento do solo. O aumento do grau de saturação leva à redução da sucção, podendo ocorrer o brusco colapso da estrutura do solo.

- quando o ar está ocluído, a permeabilidade da água controla o fluxo nos vazios. A sucção torna-se praticamente nula e a água pode fluir (Figura 1b). Dessa forma, em solos finos, há um processo clássico de deformações diferidas. É comum admitir-se que, em amostras compactadas, a oclusão ocorre em torno da umidade ótima. Em solos naturais, pode-se admitir que essa oclusão ocorre quando o grau de saturação supera 85%.

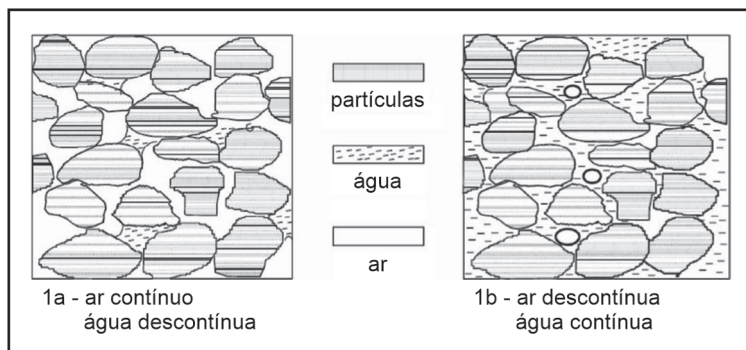


Figura 1 – Solos com ar contínuo e com ar ocluído nos vazios

As duas condições foram estudadas em 13 ensaios realizados em uma célula edométrica especial desenvolvida na Universidade de Oxford, na qual era possível determinar o grau de saturação da amostra não saturada ao final de cada carregamento. As amostras com ar contínuo foram preparadas com baixo grau de saturação, utilizando-se compactação estática. As amostras com bolhas de ar oclusas foram preparadas utilizando-se uma técnica que usa a zeólita, uma substância química que tem a característica de retirar água dos vazios, deixando, em seu lugar, um gás escolhido previamente, nesse caso, o metano. Essa técnica permite que se obtenham amostras com graus de saturação maiores que 75% e com as bolhas de gás envolvidas por uma matriz saturada (Murrieta, 1990a).

2. UM ENFOQUE ALTERNATIVO PARA INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE ADENSAMENTO EM SOLOS COM BOLHAS DE AR OCLUSAS

Brackley (1975) propôs um modelo para a estrutura de um solo em que as partículas de argila agrupavam-se em “pacotes” saturados enquanto que os vazios “inter-pacotes” encontravam-se cheios de ar conforme pode-se ver na Figura 2.

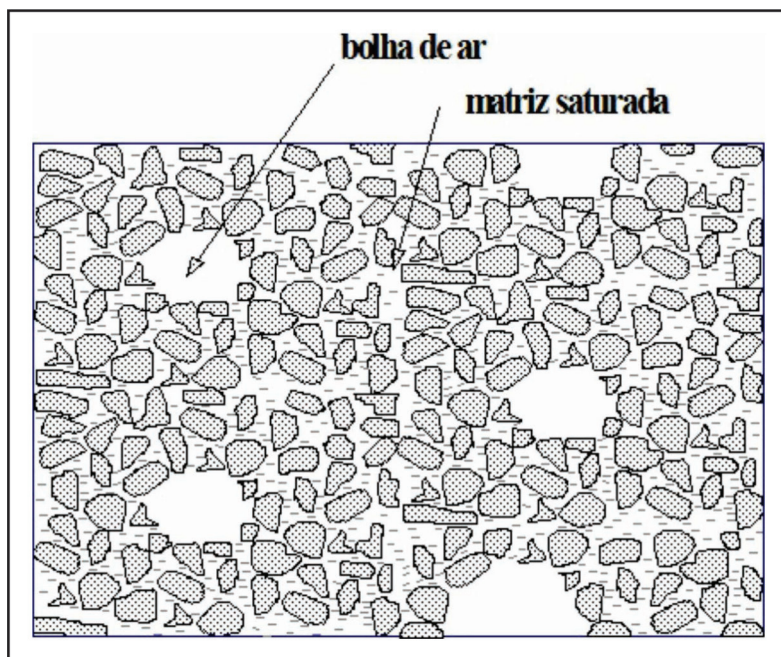


Figura 2 – Solo com bolha de ar oclusas

Brackley definiu um “*packet void ratio*” (PVR), que seria o índice de vazios desses pacotes saturados, como:

$$PVR = \frac{V_w}{V_s} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

V_w = volume de água nos vazios;

V_s = volume de sólidos da amostra.

O índice de vazios da amostra total poderia ser maior que o PVR uma vez que aquele levaria em conta o volume de ar nos vazios que, eventualmente, ocorresse.

Wheeler (1986) chamou o índice de vazios da matriz saturada (que seria o mesmo parâmetro que o PVR de Brackley) de “*matrix void ratio* e_w ”. Pode-se provar que:

$$e_w = S_r e \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:

e = índice de vazios da amostra;

S_r = grau de saturação.

Analogamente, tem-se o índice de vazios da fase gasosa, e_g :

$$e_g = \frac{V_g}{V_s} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde:

V_g = volume de gás.

Da mesma forma:

$$e_g = (1 - S_r) e \quad (\text{Eq. 4})$$

Aplicando-se estas considerações às fórmulas da teoria unidimensional do adensamento de Terzaghi, chega-se a parâmetros e equações análogos aos convencionais daquela teoria, envolvendo agora, só a matriz saturada. Por exemplo, para obter o índice de compressão da matriz saturada, C_{cw} , a partir de um ensaio de adensamento convencional, plota-se, em escala semilogarítmica, $(\sigma_v - u_w) \times e_w$. Para achar e_w basta multiplicar os valores do índice de vazios, “ e ”, pelo grau de saturação correspondente S_r . Obtida a nova curva de compressibilidade, C_{cw} será a inclinação do trecho reto, calculado como convencionalmente se faz para o índice de compressão C_c de Terzaghi. A Figura 3 mostra estas curvas.

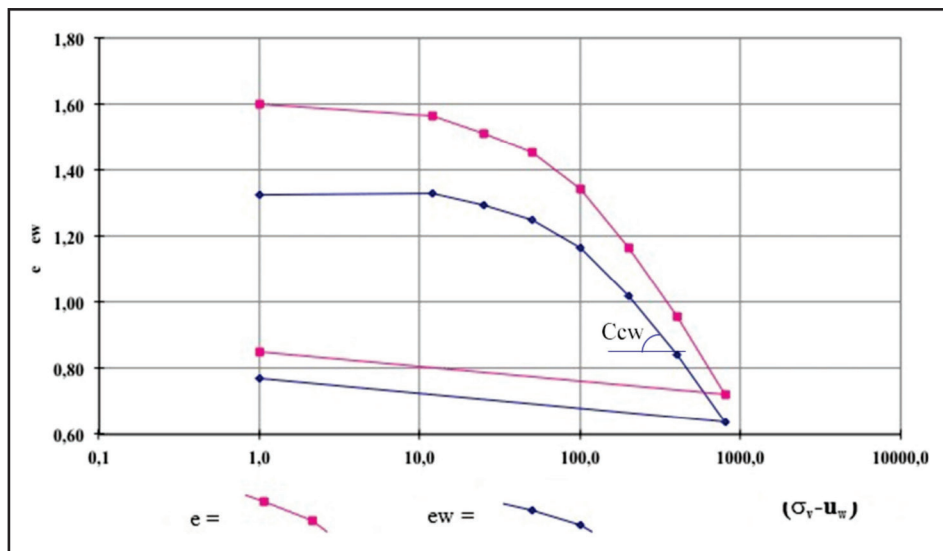


Figura 3 – Curvas de compressibilidade

Uma vez determinada a curva de compressibilidade em função de $(\sigma_v - u_w) \times e_w$ mostrada na Figura 3, assim como obteve-se o C_{ew} pode-se obter os coeficientes de variação volumétrica da matriz saturada, m_{vw} , os coeficientes de permeabilidade da matriz saturada, k_{vw} , para qualquer carregamento, exatamente como feito no adensamento convencional.

A partir de curvas tempo $\times$ altura da matriz saturada pode-se aplicar o método de Taylor, ou o de Casagrande ou o de Sivaram & Swamee (1977), para determinar-se os coeficientes de adensamento da matriz saturada, c_{vw} .

Com essas considerações, fica fácil tratar isoladamente a matriz saturada do solo utilizando a teoria do adensamento proposta por Terzaghi e tratar a fase gasosa com as equações tradicionais de compressibilidade dos gases. Esse tratamento distinto torna esta abordagem mais adequada à condição de não-saturação do solo, especialmente no que se refere à previsão dos recalques diferidos.

3. MÉTODO PARA ESTIMATIVA DE RECALQUES EM SOLOS NÃO-SATURADOS COM BOLHAS DE AR OCLUSAS

Nos solos argilosos com o ar contínuo nos vazios, não há praticamente recalque diferido. O processo que ocorre quando esse solo é sujeito a um carregamento é, nitidamente, de compressão imediata. Não havendo um processo real de adensamento em curso, a previsão dos recalques é, quase sempre, de menor importância já que, na maioria das vezes, ocorrem durante a construção e podem ser tratados adequadamente. Nesse tipo de solo as pesquisas têm se direcionado, com muita propriedade, para a expansão ou mesmo o colapso da estrutura do solo devido à variação do grau de saturação.

Nos solos argilosos com bolhas de ar oclusas há um processo de adensamento nos moldes tradicionais. Nesta situação costuma-se simplesmente aplicar a teoria unidimensional de Terzaghi. Isto pode levar a erros grosseiros uma vez que, diferentemente de um solo saturado, nesse tipo de solo ocorre uma grande parcela de deformação inicial devido tão somente à compressibilidade das bolhas de ar. A Figura 4 mostra o primeiro carregamento do ensaio OC1 executado em uma amostra com bolhas oclusas e grau de saturação inicial em torno de 75% (Murrieta, 1990). Pode-se notar que cerca de 1/3 da deformação ocorrida naquele carregamento foi devida à compressão das bolhas de ar nos momentos iniciais.

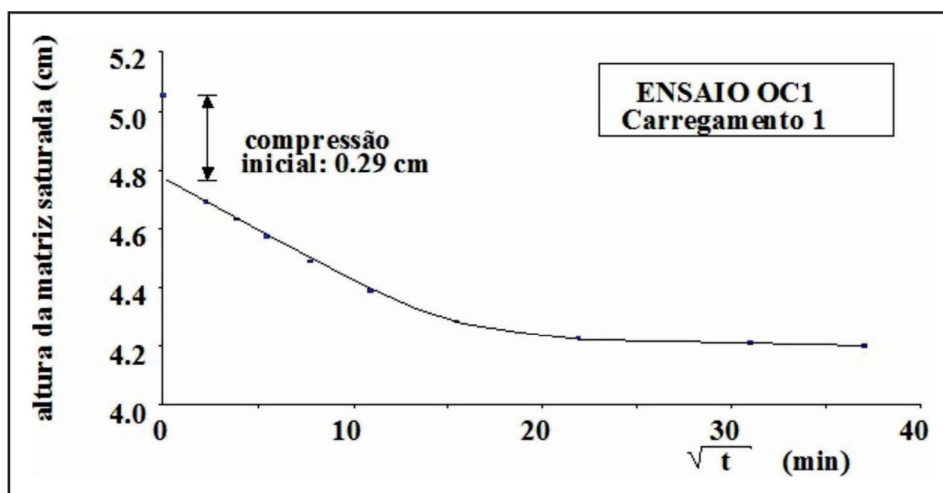


Figura 4 – Altura x tempo para o método de Taylor

Outra alternativa para a previsão das deformações é usar métodos que utilizam técnicas numéricas e parâmetros quase sempre de difícil determinação, dificultando sua utilização corriqueira. O método aqui proposto tenta contornar esse problema aliando à simplicidade de aplicação, o uso de parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento convencionais.

3.1 Hipóteses do método

O método apresentado admite as seguintes hipóteses:

- i) validade da teoria unidimensional de Terzaghi para a previsão do adensamento em solos saturados;
- ii) a lei de Boyle representa corretamente a compressão dos gases nos vazios;
- iii) relação única entre a tensão vertical, $(\sigma_v - u_w)$, e o índice de vazios da matriz saturada, e_w ;
- iv) com a oclusão, a bolha fica retida entre as partículas, não fluindo livremente com a água;

v) a pressão inicial na bolha de gás é igual à tensão total que atua na amostra em torno da bolha.

Com relação à hipótese i, mesmo com as restrições que existem em relação à teoria de Terzaghi, o seu uso é amplamente aceito entre os engenheiros geotécnicos. O mesmo pode-se dizer da hipótese ii.

A hipótese iii é análoga à de Terzaghi referente às tensões efetivas e índice de vazios e tem suporte experimental nos trabalhos de Nageswaran (1983), Wheeler (1986), Thomas (1987), Boden (1989) e Murrieta (1990b).

A hipótese iv tem sido aceita por um grande número de pesquisadores, tais como Biot (1941), Taylor (1942), Scott (1965), Barden (1979), Thomas (1987), pois, considerando a dimensão dos canalículos de um solo argiloso, é pouco provável que haja fluxo livre da bolha de ar nos vazios em quantidade significativa.

Em relação à hipótese v, é certo que se a bolha estiver completa e exclusivamente envolvida pela água dos vazios, como se vê na Figura 1b, esta hipótese não é válida, uma vez que, nesse caso, a dissipação da pressão na água teria por consequência a expansão da bolha com redução de sua pressão, ou seja, a pressão da água é que controlaria a pressão na bolha. Entretanto, tendo ainda em vista a dimensão dos canalículos de um solo argiloso, esta consideração – a água envolver completa e exclusivamente a bolha – é pouco razoável. No trabalho de Thomas (1987) e de Murrieta (1990b) a hipótese da pressão inicial da bolha ser igual à tensão total atuante em torno da bolha, mesmo com a água dos vazios em condições hidrostáticas, mostrou-se plenamente aceitável para solos do tipo mostrado na Figura 2, em que a bolha de ar é envolvida por uma matriz de solo saturada.

A bem da simplicidade, desprezou-se a dissolução do ar na água, ou seja, considerou-se o coeficiente de solubilidade de Henry, (H), igual a zero. No entanto, um valor diferente de zero para H pode ser usado, bastando para isso incorporar-se a lei de Henry à lei de Boyle conforme feito por Murrieta (1990b). Deve se ter em conta que esta inclusão traria uma maior complexidade ao método e, provavelmente, sem a contrapartida de melhorar seus resultados, devido às dúvidas que se possa vir a ter sobre o valor de H.

3.2 Formulação matemática

A partir da amostra não saturada, idealizada, mostrada na Figura 5, chega-se a conclusão que o recalque total ocorrido é igual a:

$$\Delta H = \Delta H_g + \Delta H_w \quad (\text{Eq. 5})$$

sendo:

$$\Delta H_g = \frac{\Delta e_g}{1 + e_o} H_o \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\Delta H_w = \frac{\Delta e_w}{1 + e_o} H_o \quad (\text{Eq. 7})$$

onde:

Δe_g = variação do índice de vazios da fase gasosa;

Δe_w = variação do índice de vazios da matriz saturada;

H_o = espessura da amostra ou da camada de solo;

e_o = índice de vazios inicial.

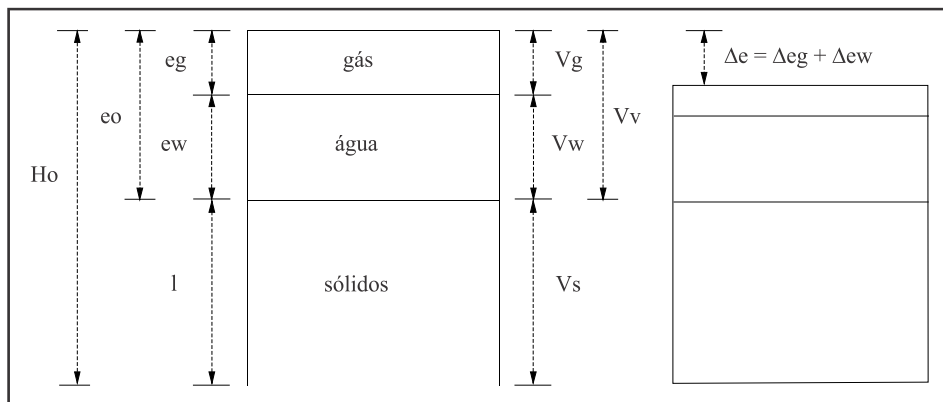


Figura 5 – Amostra Idealizada

A Equação 6 representa a variação da altura da fase gasosa e pode ser calculada usando-se a lei de Boyle. Da mesma forma a Equação 7 é a variação da altura da matriz saturada e pode ser calculada com a teoria de Terzaghi.

Tem-se então:

$$\Delta H = \frac{\Delta e_g}{1 + e_o} H_o + \frac{\Delta e_w}{1 + e_o} H_o \quad (\text{Eq. 8})$$

3.2.1 Cálculo da variação da altura da fase gasosa, ΔH_g

Da lei de Boyle tem-se:

$$u_{go}^* V_{go} = u_{gf}^* V_{gf} \quad (\text{Eq. 9})$$

sendo:

u_{go}^* = pressão absoluta inicial do gás = $u_{go} + u_{atm}$;

u_{gf}^* = pressão absoluta final do gás = $u_{gf} + u_{atm}$;

u_{go}, u_{gf} = pressões inicial e final da bolha de gás;

V_{go}, V_{gf} = volumes inicial e final da bolha de gás;

u_{atm} = pressão atmosférica.

$$u_{go}^* H_{go} = u_{gf}^* (H_{go} - \Delta H_g) \quad (\text{Eq. 10})$$

A equação 10 pode ser reescrita como:

$$\Delta H_g = H_{go} \left(1 - \frac{u_{go}^*}{u_{gf}^*} \right) \quad (\text{Eq. 11})$$

O acréscimo de pressão (não absoluta) atuando na bolha de gás pode ser considerado como uma função do acréscimo da tensão vertical total através de um parâmetro definido como coeficiente de pressão de gás:

$$\bar{B}_g = \frac{\Delta u_g}{\Delta \sigma_v} \quad (\text{Eq. 12})$$

onde $\bar{B}_g$ seria um coeficiente análogo ao $\bar{B}$ de Skempton (1954) só que relacionado ao acréscimo de pressão na bolha de gás. Seu valor depende fundamentalmente da estrutura do solo não saturado e por isso mesmo, muito difícil de ser correlacionado com algum outro parâmetro. O que se propõe é que $\bar{B}_g$ seja obtido a partir da curva de compressibilidade do ensaio de adensamento, para a mesma faixa de pressão que ocorrerá na situação de campo (Murrieta, 1990).

Da equação 10 e dos conceitos de u_{go} e u_{gf} , tem-se:

$$u_{gf} = \frac{(u_{go} + u_{atm})H_{go}}{H_{gf}} - u_{atm} \quad (\text{Eq. 13})$$

Utilizando-se as definições de grau de saturação e de índice de vazios chega-se à seguinte equação para cálculo do valor de H_{go} na amostra (ou na camada).

$$H_{go} = \frac{H_o e_o (1 - S_{ro})}{1 + e_o} \quad (\text{Eq. 14})$$

A altura de gás final da amostra para qualquer incremento de pressão é igual a:

$$H_{gf} = H_{go} - \Delta H_g \quad (\text{Eq. 15})$$

Substituindo as Equações 6 e 14 em 15, tem-se:

$$\Delta H_{gf} = \frac{H_o}{1 + e_o} [e_o (1 - S_{ro}) - \Delta e_g] \quad (\text{Eq. 16})$$

Substituindo em 18 o valor de:

$$\Delta e_g = e_o (1 - S_{ro}) - e_f (1 - S_{rf}) \quad (\text{Eq. 17})$$

tem-se

$$H_{gf} = \frac{H_o (1 - S_{rf}) e_f}{1 + e_o} \quad (\text{Eq. 18})$$

onde e_f é o índice de vazios final da amostra devido a um carregamento.

Substituindo 2 em 20 tem-se:

$$H_{gr} = \frac{H_o(1-S_{rf})e_{wf}}{(1+e_o)S_{rf}} \quad (\text{Eq. 19})$$

e_{wf} é o índice de vazios final da matriz saturada e pode ser escrito como:

$$e_{wf} = e_o S_{ro} - \Delta e_w \quad (\text{Eq. 20})$$

O valor de Δe_w pode ser calculado através das curvas $(\sigma_v - u_w) \times e_w$ (v. Figura 3).

$$\Delta e_w = C_{cw} \log \frac{(\sigma_{vf} - u_w)}{(\sigma_{vi} - u_w)} \quad (\text{Eq. 21})$$

onde:

$\sigma_{vi} - u_w$ = tensão inicial;

$\sigma_{vf} - u_w$ = tensão ao fim do incremento;

C_{cw} = índice de compressão da matriz saturada.

Aplicando-se as equações 22 e 23 na Equação 21, chega-se à expressão para o cálculo da altura final de gás:

$$H_{gr} = \frac{H_o(1-S_{rf}) \left(S_{ro} e_o - C_{cw} \log \frac{\sigma_{vf} - u_w}{\sigma_{vi} - u_w} \right)}{(1+e_o)S_{rf}} \quad (\text{Eq. 22})$$

O valor de S_{rf} ao final de um carregamento drenado, necessário à aplicação da Equação 24, pode ser obtido com excelente aproximação, como mostrado no item seguinte.

Com o valor de H_{go} obtido com a Equação 16, o de H_{gr} obtido com a Equação 24 e considerando a hipótese “v” onde o valor de u_{go} é admitido como sendo igual à tensão total do solo que envolve a bolha, aplica-se a Equação 15 e chega-se ao valor da pressão final na bolha de ar no ensaio. Com esse valor e conhecendo-se o acréscimo de tensão vertical total, aplicando-se a Equação 14 chega-se ao valor de $\bar{B}_g$ da amostra para esse acréscimo de tensão.

Pode-se então, aplicar a Equação 10, 11 e 14 na Equação 13 e obter-se o valor de ΔH_g da camada:

$$\Delta H_g = H_{go} \left(1 - \frac{u_{go} + u_{atm}}{u_{go} + u_{atm} + \bar{B}_g \Delta \sigma_v} \right) \quad (\text{Eq. 23})$$

3.2.2 Cálculo do grau de saturação ao final de cada carregamento

Os valores do grau de saturação durante o ensaio não estão disponíveis nos ensaios de adensamento em equipamentos convencionais. Nesse caso, apenas o grau de saturação inicial (antes do primeiro carregamento) e o final (após o último descarregamento), estão

disponíveis. Conforme ressaltado anteriormente, a célula de adensamento de Oxford foi projetada especialmente para ensaiar solos com bolhas de ar oclusas e tinha características únicas como permitir a determinação do grau de saturação da amostra ao final de cada carregamento. A partir dessas determinações da célula de Oxford, observou-se uma relação logarítmica entre a tensão vertical ($\sigma_v - u_w$) e o grau de saturação (S_r) ao final de cada carregamento, do tipo mostrado na Figura 6.

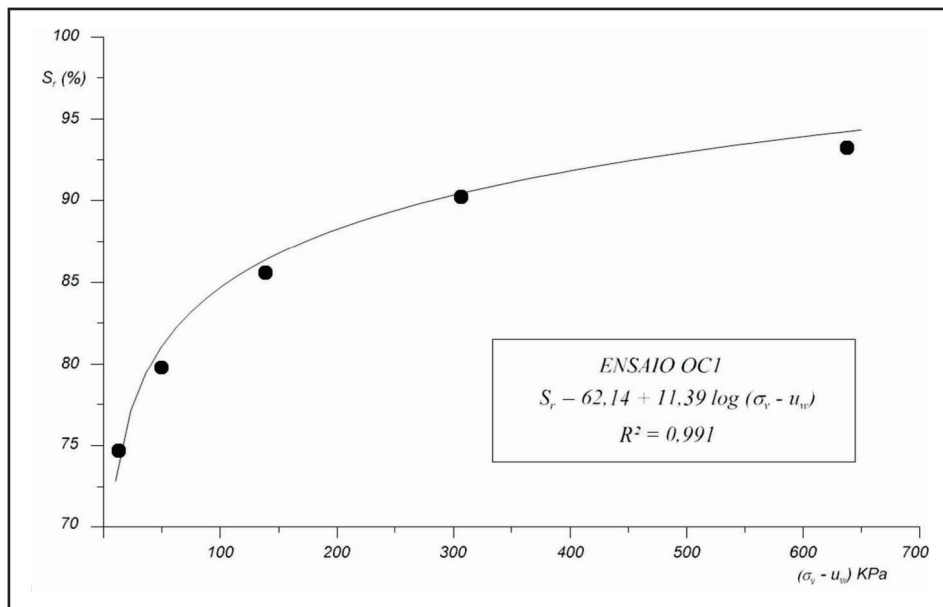


Figura 6 – Pressão x Grau de Saturação

Considerando isso, propõe-se a seguinte equação para o cálculo de S_r ao final de qualquer incremento drenado (Murrieta 1991):

$$S_r = a + b \log (\sigma_v - u_w) \quad (\text{Eq. 24})$$

onde:

$$b = \frac{S_{rf} - S_{ri}}{\log \frac{\sigma_{vf} - u_w}{\sigma_{vi} - u_w}} \quad (\text{Eq. 25})$$

a = valor de S_r quando $(\sigma_v - u_w) = 1$ kPa, podendo ser calculado com a expressão:

$$a = S_{ri} - b \log (\sigma_{vi} - u_w) \quad (\text{Eq. 26})$$

A Tabela 1 compara os graus de saturação medidos em 6 ensaios executados na célula de Oxford, com os obtidos com as equações acima tendo-se usado para a determina-

ção de a e b os valores do primeiro e último carregamento de cada ensaio, o que se tem sempre em qualquer ensaio de adensamento convencional. Pode-se ver a excelente aproximação conseguida para os valores intermediários. Observa-se que para $S_r = 100\%$, $b = 0$ e $a = 100$.

Tabela 1 – Graus de Saturação Medidos e Calculados

	$\sigma_v - u_w$ kPa	S_r medido %	S_r calculado %
ENSAIO OC1	12,7	74,7	74,7
	48,9	79,8	81,4
$a = 62,14$	138,7	86,4	86,5
$b = 11,39$	306,8	91,1	90,5
	637,8	94,1	94,1
ENSAIO OC2	21,2	78,5	78,5
	71,1	83,9	84,3
$a = 63,88$	136,8	87,7	87,4
$b = 11,00$	230,6	91,1	89,9
	383,1	92,3	92,3
ENSAIO OC3	63,1	79,6	79,6
	164,0	84,4	84,1
$a = 60,10$	305,3	88,0	87,0
$b = 10,85$	431,0	88,7	88,7
ENSAIO OC4	69,9	83,6	83,6
	140,2	87,3	86,8
$a = 64,34$	264,7	90,6	89,7
$b = 10,46$	394,4	91,5	88,7
ENSAIO OC5	21,2	87,6	87,6
	97,3	90,2	90,7
$a = 81,49$	181,6	91,6	91,9
$b = 4,63$	291,2	92,9	92,9
	419,0	93,6	93,6
ENSAIO OC6	20,1	94,2	94,2
	89,7	96,1	95,6
$a = 91,46$	200,8	97,9	96,4
$b = 2,13$	296,6	98,0	96,7
	397,2	97,0	97,0

3.2.3 Cálculo da variação da altura da matriz saturada, ΔH_w

Substituindo-se a Equação 23 em 7 tem-se:

$$\Delta H_w = \frac{H_o C_{cw} \log \frac{(\sigma_{vf} - u_w)}{(\sigma_{vo} - u_w)}}{1 + e_o} \quad (\text{Eq. 27})$$

3.2.4 Variação do recalque com o tempo

Para o cálculo da variação de recalques com o tempo admite-se que a compressão do ar ocorre imediatamente. A partir daí, utiliza-se o coeficiente de adensamento da matriz saturada, c_{vw} , obtido no ensaio para aquele carregamento e calcula-se o fator tempo com a Equação 30:

$$T = \frac{C_{cw} - t}{H_d^2} \quad (\text{Eq. 28})$$

onde:

T = fator tempo

t = tempo

H_d = maior caminho de drenagem na amostra ou na camada, descontada a compressão inicial do ar, ΔH_g .

De posse do fator tempo para diversos tempos, calcula-se as percentagens de adensamento ($U\%$) correspondentes e aplica-se estas percentagens ao recalque total calculado para a matriz saturada. O recalque a qualquer tempo t será obtido com a Equação 31:

$$\Delta H_t = \Delta H_g + U \Delta H_w \quad (\text{Eq. 29})$$

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

O primeiro exemplo mostra como, a partir de um ensaio convencional de adensamento realizado em uma amostra não saturada com bolhas de ar oclusas, pode-se obter todos os parâmetros necessários para a aplicação do método apresentado. O segundo exemplo apresenta a previsão dos recalques em uma camada natural de argila com grau de saturação inicial de 83%, o que caracteriza a ocorrência de bolhas de ar oclusas.

4.1 Ensaio de adensamento

É dado na Tabela 2 um conjunto de leituras efetuadas durante a realização de um ensaio de adensamento com 7 incrementos de carga e 1 de descarga em uma amostra de argila com bolhas de ar oclusas. Além disso são dados:

- densidade real dos grãos = 2,65
- diâmetro do anel de adensamento = 50 mm
- massa do anel de adensamento = 325 g
- massa do anel de adensamento + amostra = 385 g
- altura inicial da amostra = 20 mm
- altura final da amostra = 14,2 mm
- umidade inicial da amostra = 50%
- umidade final da amostra = 35 %
- constante do extensômetro = 0,01 mm/div.

Pede-se:

- determinação para cada incremento de carga do:
- coeficiente de adensamento, c_{vw} , pelo critério de Sivaram & Swamee;
- coeficiente de variação volumétrica, m_{vw} ;
- coeficiente de permeabilidade, k_{vw} ;
- coeficiente de pressão de gás, $\overline{B}_g$;
- traçado da curva de compressibilidade $(\sigma_v - u_w) \times e_w$;
- determinação do índice de compressão C_{cw} ;

Tabela 2 – Dados do Ensaio

tempo (min)	CARREGAMENTOS (kPa)						
	12	25	50	100	200	400	800
leituras no extensômetro (divisões)							
0,00	2000,0	1973,8	1931,4	1885,3	1802,2	1666,2	1505,3
0,10	1998,6	1956,6	1912,6	1863,2	1769,5	1624,5	1462,4
0,25	1997,7	1955,6	1911,3	1860,9	1766,3	1620,0	1452,8
0,50	1996,7	1954,5	1910,3	1859,1	1763,0	1615,5	1443,0
1,00	1995,0	1953,6	1909,0	1856,4	1758,4	1609,8	1432,0
2,00	1993,2	1951,7	1907,2	1853,6	1752,9	1602,4	1419,3
4,00	1990,0	1949,0	1905,1	1850,0	1746,0	1593,5	1405,3
8,00	1986,1	1945,8	1902,6	1845,0	1735,6	1580,0	1388,6
15,00	1981,6	1941,1	1899,5	1837,7	1722,4	1561,6	1369,0
30,00	1978,2	1938,3	1894,4	1827,7	1705,1	1539,4	1353,1
60,00	1976,7	1936,0	1890,4	1816,0	1687,6	1523,4	1353,1
120,0	1975,4	1933,8	1887,9	1810,1	1676,0	1514,6	1332,9
240,0	1974,4	1932,3	1886,4	1806,9	1670,3	1510,8	1328,0
480,0	1974,0	1931,7	1885,8	1803,6	1668,0	1507,5	1325,3
1440,0	1973,8	1931,4	1885,3	1802,2	1666,2	1505,3	1323,9
tempo (min)	DESCARREGAMENTO DE 800 A 0 kPa						
	leituras no extensômetro (div)						
0	1323,9						
1440	1423,9						

Em recente trabalho, Del Duca (2015) apresenta um programa em Visual Basic que a partir dos dados de um ensaio de adensamento convencional, calcula todos os parâmetros necessários para a utilização do método aqui proposto. Apresenta-se a seguir os resultados obtidos com esse programa, que está disponível no site da ABMS.

Tabela 3 – Dados Fornecidos

Parâmetros fornecidos da amostra e do anel	
Densidade real dos grãos (G)	2,65
Umidade inicial, w_o (%)	50,00
Umidade final, w_f (%)	35,00
Massa do anel + amostra, M_{a+a} (g)	385,00
Massa do anel, M_a (g)	325,00
Diâmetro do anel, d (mm)	50,00
Altura do anel, h_o (mm)	20,00
Constante do extensômetro, C_e (mm/div)	0,010
Altura final da amostra, h_f (mm)	14,24
Peso específico da água, γ_w (kN/m ³)	10,00
Aceleração da gravidade, g (m/s ²)	9,81

Tabela 4 – Dados Calculados

Parâmetros calculados da amostra e do anel	
Peso específico natural, γ_{nat} (kN/m ³)	15,28
Peso específico dos grãos, γ_g (kN/m ³)	26,50
Peso específico seco, γ_d (kN/m ³)	10,19
Índice de vazios inicial, e_o	1,602
Índice de vazios final, e_f	0,852
Grau de saturação inicial S_{ro} (%)	82,73
Grau de saturação final, S_{rf} (%)	90,18
Massa total inicial da amostra seca, M_d (g)	40,00
Volume total inicial da amostra, V_t (cm ³)	39,27
Altura de sólidos da amostra, h_s (mm)	7,69

Para o cálculo desses parâmetros foram utilizadas as conhecidas fórmulas da Mecânica dos Solos:

$$\gamma_{nat} = \frac{M_t}{V_t} g = \frac{M_{a+a} - M_a}{V_t} g \quad (\text{Eq. 30})$$

$$\gamma_g = G \gamma_w \quad (\text{Eq. 31})$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{nat}}{1 + \frac{W_o}{100}} \quad (\text{Eq. 32})$$

$$e_o = \frac{\gamma_g}{\gamma_d} - 1 \quad (\text{Eq. 33})$$

$$S_{ro} = \frac{Gw_o}{e_o} 100 \quad (\text{Eq. 34})$$

$$M_d = \frac{M_t}{1 + W_o} = \frac{M_{a+a} - M_a}{1 + W_o} \quad (\text{Eq. 35})$$

$$V_t = \frac{\pi d^2}{4} \quad (\text{Eq. 36})$$

$$h_s = \frac{h_o}{1 + e_o} \quad (\text{Eq. 37})$$

Com os parâmetros conhecidos e a leitura do extensômetro na Tabela 2, pode-se preencher a Tabela 5 e outras semelhantes (que não serão aqui apresentadas) para todos os carregamentos do ensaio usando as seguintes expressões:

a) Altura da amostra, h_t

Com a altura inicial da amostra, as leituras do extensômetro e sua constante pode-se calcular a altura da amostra em qualquer tempo:

$$h_t = h_0 - (L_0 - L_t) C_e \quad (\text{Eq. 38})$$

sendo:

- h_t = altura da mostra no tempo t ;
- h_0 = altura inicial da mostra;
- L_0 = leitura inicial no extensômetro;
- L_t = leitura no extensômetro no tempo t ;
- C_e = constante do extensômetro.

b) Índice de vazios da amostra

Conhecendo-se a altura de sólidos, h_s , e a altura da amostra h_t , pode-se determinar o índice de vazios a qualquer momento com a Equação 41:

$$e_t = \frac{h_t}{1 + h_s} - 1 \quad (\text{Eq. 39})$$

c) Grau de saturação da amostra

A determinação do grau de saturação durante o processo de deformação que ocorre em cada carregamento não está disponível em ensaios convencionais de adensamento, portanto, algumas considerações devem ser feitas nesta questão.

Em um item anterior mostrou-se como estimar o grau de saturação a partir do conhecimento de pares de valores iniciais e finais de $(\sigma_v - u_w) \times S_r$. O valor inicial é sempre co-

nhecido: é o grau de saturação no início do ensaio. O problema se apresenta quanto à saturação final pois, o que se conhece nos ensaios de adensamento convencionais é o grau de saturação final do ensaio, isto é, após o descarregamento da amostra, portanto, ela sofreu uma expansão em relação ao final do último carregamento (em geral de 800 kPa). Nesse caso, para determinar o grau de saturação ao final do último carregamento (que é o usado na Equação 27), considera-se que o volume de água que entrou na amostra devido à expansão que ela sofreu com o descarregamento é igual ao aumento de volume da amostra. Isso significa admitir que, se houvesse ainda alguma bolha de ar na amostra ao final do carregamento, esta bolha não aumentaria de volume com a expansão e isso é consistente com a hipótese “v” do método.

Cabe observar que esta consideração leva a um cálculo retroativo do grau de saturação no final do último carregamento a partir do grau de saturação medido ao final do ensaio, após o descarregamento. A Equação 43 permite esse cálculo. Dai por diante, os graus de saturação ao final dos demais carregamento podem ser calculados com as Equações 26, 27 e 28.

$$S_{r800} = \frac{\left[\frac{S_{rf}}{100} (h_f - h_s) \right] - (h_f - h_{800})}{(h_{800} - h_s)} 100 \quad (\text{Eq. 40})$$

$$S_{r800} = \frac{\left[\frac{90,18}{100} (14,239 - 7,69) \right] - (14,239 - 13,239)}{(13,239 - 7,69)} 100 = 88,41\%$$

De posse do grau de saturação ao final de cada carregamento, é necessário saber como seria a variação de S_r ao longo daquele carregamento no tempo de 0 a 24 horas (esse dado é necessário para o cálculo da altura da matriz saturada, h_w , conforme mostra a Equação 43). Sendo consistente com outra hipótese do método que diz que a deformação das bolhas de gás ocorre imediatamente após o carregamento, admite-se que o grau de saturação imediatamente após qualquer carregamento seja o mesmo grau de saturação do final daquele carregamento, o que é correto para amostras saturadas e parece estar muito próximo da realidade de amostras com bolhas de ar oclusas.

d) Altura da matriz saturada, h_w

Com os valores da altura dos sólidos, do índice de vazios e do grau de saturação, pode-se calcular o h_w com a Equação 43.

$$h_w = \left(1 + \frac{S_r}{100} e \right) h_s \quad (\text{Eq. 41})$$

e) Altura da fase gasosa, h_g

A altura da fase gasosa pode ser encontrada com a simples subtração da altura da amostra da altura da matriz saturada:

$$h_g = h_l - h_w$$

(Eq. 42)

f) Índice de vazios da matriz saturada, e_w

Para determinar-se o e_w , multiplica-se os valores dos índices de vazios da amostra pelo grau de saturação conforme visto na Equação 2.

Tabela 5 – Tensão Vertical: 12 kPa

t	Leit.Ext.	h_l	e	S_r	h_w	h_g	e_w
(min)	(div)	(mm)		%	(mm)	(mm)	
0,00	2000,0	20,000	1,602	82,73	17,873	2,127	1,325
0,10	1998,6	19,986	1,600	84,84	18,121	1,865	1,357
0,25	1997,7	19,977	1,599	84,84	18,114	1,863	1,356
0,50	1996,7	19,967	1,597	84,84	18,105	1,862	1,355
1,00	1995,0	19,950	1,595	84,84	18,091	1,859	1,353
2,00	1993,2	19,932	1,593	84,84	18,076	1,856	1,351
4,00	1990,0	19,900	1,589	84,84	18,048	1,852	1,348
8,00	1986,1	19,861	1,584	84,84	18,015	1,846	1,343
15,00	1981,6	19,816	1,578	84,84	17,977	1,839	1,339
33,11	1978,2	19,782	1,573	84,84	17,949	1,834	1,335
60,00	1976,7	19,767	1,571	84,84	17,936	1,831	1,333
120,00	1975,4	19,754	1,570	84,84	17,925	1,829	1,332
240,00	1974,4	19,744	1,568	84,84	17,916	1,828	1,330
480,00	1974,0	19,740	1,568	84,84	17,913	1,827	1,330
1440,00	1973,8	19,738	1,567	84,84	17,911	1,827	1,330

A Tabela 6 mostra a variação da altura da amostra para todos os carregamentos a partir da coluna 3 de tabelas semelhantes à Tabela 5.

Tabela 6 – Tempo x Altura da Amostra

t (min)	CARREGAMENTO (kPa)						
	12	25	50	100	200	400	800
	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)
0,00	20,000	19,738	19,314	18,853	18,022	16,662	15,053
0,10	19,986	19,566	19,126	18,632	17,695	16,245	14,624
0,25	19,977	19,556	19,113	18,609	17,663	16,200	14,528
0,50	19,967	19,545	19,103	18,591	17,630	16,155	14,430
1,00	19,950	19,536	19,090	18,564	17,584	16,098	14,320
2,00	19,932	19,517	19,072	18,536	17,529	16,024	14,193

t (min)	CARREGAMENTO (kPa)						
	12	25	50	100	200	400	800
	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)
4,00	19,900	19,490	19,051	18,500	17,460	15,935	14,053
8,00	19,861	19,458	19,026	18,450	17,356	15,800	13,886
15,0	19,816	19,411	18,995	18,377	17,224	15,616	13,690
30,0	19,782	19,383	18,944	18,277	17,051	15,394	13,531
60,0	19,767	19,360	18,904	18,160	16,876	15,234	13,404
120,0	19,754	19,338	18,879	18,101	16,760	15,146	13,329
240,0	19,744	19,323	18,864	18,069	16,703	15,108	13,280
480,0	19,740	19,317	18,858	18,036	16,680	15,075	13,253
1440,0	19,738	19,314	18,853	18,022	16,662	15,053	13,239

A Tabela 7 mostra a variação da altura da matriz saturada da amostra para todos os carregamentos a partir da coluna 6 de tabelas semelhantes à Tabela 5.

Tabela 7 – Tempo x Altura da Matriz Saturada da Amostra

t (min)	CARREGAMENTO (kPa)						
	12	25	50	100	200	400	800
	h _w (mm)	h _w (mm)	h _w (mm)	h _w (mm)	h _w (mm)	h _w (mm)	h _w (mm)
0,00	17,873	17,911	17,624	17,296	16,641	15,516	14,155
0,10	18,121	17,839	17,530	17,170	16,417	15,202	13,820
0,25	18,114	17,831	17,519	17,150	16,389	15,163	13,735
0,50	18,105	17,821	17,511	17,134	16,360	15,123	13,648
1,00	18,091	17,813	17,499	17,111	16,320	15,073	13,551
2,00	18,076	17,797	17,484	17,087	16,272	15,008	13,439
4,00	18,048	17,774	17,466	17,055	16,212	14,930	13,315
8,00	18,015	17,747	17,444	17,012	16,121	14,812	13,167
15,0	17,977	17,707	17,418	16,949	16,006	14,650	12,994
30,0	17,949	17,683	17,374	16,862	15,855	14,455	12,853
60,0	17,936	17,663	17,339	16,761	15,702	14,315	12,741
120,0	17,925	17,644	17,318	16,710	15,601	14,237	12,675
240,0	17,916	17,631	17,305	16,682	15,552	14,204	12,632
480,0	17,913	17,626	17,300	16,653	15,531	14,175	12,608
1440,0	17,911	17,624	17,296	16,641	15,516	14,155	12,595

g) Coeficiente de variação volumétrica, m_v

Os valores de m_v são mostrados na Tabela 8 e obtidos a partir da Equação 45:

$$m_w = \frac{\Delta \varepsilon_w}{\Delta(\sigma_v - u_w)} \quad (\text{Eq. 43})$$

Para determinação de $\Delta \varepsilon_w$ utiliza-se a Equação 46 que por sua vez necessita do conhecimento dos índices de vazios iniciais e finais de cada carregamento da matriz saturada (e_{wi} e e_{wf}) que podem ser lidos na coluna 8 de tabelas semelhantes à Tabela 5.

$$\Delta \varepsilon_w = \frac{\Delta e_w}{1 + e_{wi}} 100 = \frac{e_{wi} - e_{wf}}{1 + e_{wi}} 100 \quad (\text{Eq. 44})$$

Desta forma pode-se montar a Tabela 8:

Tabela 8 – Valores de m_{vw}

$\sigma_v - u_w$	e_w		$\Delta \varepsilon_w$	m_{vw}
kPa	inicial	final	%	(m ² /kN)
12	1,325	1,330	-0,21	-1,89E-04
25	1,330	1,293	1,60	6,67E-04
50	1,293	1,250	1,86	3,80E-04
100	1,250	1,165	3,78	3,82E-04
200	1,165	1,018	6,76	3,40E-04
400	1,018	0,841	8,77	2,20E-04
800	0,841	0,638	11,02	1,38E-04

h) Coeficiente de adensamento da matriz saturada usando o critério de Sivaram & Swamee (1977)

Para o cálculo de c_{vw} utiliza-se a proposta de Sivaram & Swamee (1977):

$$c_{vw} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_1 - d_2}{d_0 - d_{100}} \frac{H_d}{\sqrt{t_0} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (\text{Eq. 45})$$

$$d_0 = \frac{d_1 - d_2 \sqrt{\frac{t_1}{t_2}}}{1 - \sqrt{\frac{t_1}{t_2}}} \quad (\text{Eq. 46})$$

$$d_{100} = d_0 - \frac{d_1 - d_3}{\left\{ 1 - \left[\frac{(d_0 - d_3)(\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1})}{(d_1 - d_2)\sqrt{t_3}} \right]^{5,6} \right\}^{0,179}} \quad (\text{Eq. 47})$$

$$H_d = \frac{H_0 + H_{100}}{4} \quad (\text{Eq. 48})$$

onde:

d_1 = altura da amostra para o tempo t_1 ;

d_2 = altura da amostra para o tempo t_2 ;

d_3 = altura da amostra para o tempo t_3 ;

t_1 = tempo de 0,25 min;

t_1 = tempo de 2,0 min;

t_1 = tempo de 120 min;

d_0 = altura da amostra no início do adensamento obtida com a Equação 51:

d_{100} = altura da amostra no 100% do adensamento obtida com a Equação 50:

H_d = maior caminho de drenagem da amostra e igual a:

Com as Equações 47, 48, 49 e 50 e com as alturas da matriz saturada correspondentes aos tempos de 0,25 min, 1,0 min e 120 min, obtidos na Tabela 7 pode-se montar a Tabela 9:

Tabela 9 – Valores de c_{vw} da matriz saturada pelo método de Sivaram & Swamee (1977)

$\sigma_v - u_w$	d_1	d_2	d_3	t_1	t_2	t_3	d_0	d_{100}	H_d	c_{vw}
kPa	mm	mm	mm	min	min	min	mm	mm	mm	m ² /s
12,0	18,114	18,076	17,925	0,25	2,0	120,0	18,13	17,92	9,01	4,2E-08
25,0	17,831	17,797	17,644	0,25	2,0	120,0	17,85	17,64	8,87	3,2E-08
50,0	17,519	17,484	17,318	0,25	2,0	120,0	17,54	17,32	8,71	3,0E-08
100,0	17,150	17,087	16,710	0,25	2,0	120,0	17,18	16,70	8,47	1,9E-08
200,0	16,389	16,272	15,601	0,25	2,0	120,0	16,45	15,59	8,01	1,9E-08
400,0	15,163	15,008	14,237	0,25	2,0	120,0	15,25	14,23	7,37	2,0E-08
800,0	13,735	13,439	12,675	0,25	2,0	120,0	13,90	12,67	6,64	4,1E-08

i) Coeficiente de permeabilidade da matriz saturada, k_{vw}

A determinação de k_{vw} é feita com a Equação 51, usando os valores de c_{vw} mostrados na Tabela 9 e os de m_{vw} na Tabela 8. Desta forma, monta-se a Tabela 10:

$$k_{vw} = c_{vw} m_{vw} \gamma_w \quad (\text{Eq. 49})$$

Tabela 10 – Valores de k_{vw}

$\sigma_v - u_w$	c_{vw}	m_{vw}	k_{vw}
(KPa)	m ² /s	(m ² /kN)	m/s
12	4,2E-08	-1,9E-04	-7,9E-11
25	3,2E-08	6,7E-04	5,7E-11
50	3,0E-08	3,8E-04	5,7E-10

$\sigma_v - u_w$	c_{vw}	m_{vw}	k_{vw}
(KPa)	m ² /s	(m ² /kN)	m/s
100	1,9E-08	3,8E-04	2,2E-10
200	1,9E-08	0,4E-04	2,4E-09
400	2,0E-08	2,2E-04	1,4E-09
800	4,1E-08	1,4E-04	2,8E-10

j) Coeficiente de pressão de gás, $\overline{B}_g$

Calcula-se o $\overline{B}_g$ com a Equação 51:

$$\overline{B}_g = \frac{\Delta u_g}{\Delta \sigma_v} = \frac{u_{gf} - u_{gi}}{\sigma_{vf} - \sigma_{vi}}$$
 (Eq. 50)

Os valores de u_{gi} são admitidos como iguais à tensão total daquele carregamento e os de u_{gf} podem ser determinados com a Equação 51:

$$u_{gf} = \frac{(u_{gf} + u_{atm}) H_{gi}}{H_{gf}} - u_{atm}$$
 (Eq. 51)

u_{atm} = pressão atmosférica = 101,3 kPa

$$H_{gi} = \frac{H_i e_i (1 - S_{ri})}{1 + e_i}$$
 (Eq. 52)

$$H_{gf} = \frac{H_i (1 - S_{ri}) \left(S_{ri} e_i - C_{cw} \log \frac{\sigma_{vf} - u_w}{\sigma_{vi} - u_w} \right)}{1 + e_i}$$
 (Eq. 53)

Os valores de h_i , e_{wi} , e_{wf} , S_{ri} , e S_{rf} , são transcritos de tabelas semelhantes à Tabela 5.

Tabela 11 – Cálculo de $\overline{B}_g$

$\sigma_i - u_w$ kPa	$\sigma_f - u_w$ kPa	h_i cm	e_{wi}	e_{wf}	S_{ri} %	S_{rf} %
1	12	2,000	1,602	1,567	82,73	84,84
12	25	1,974	1,567	1,512	84,84	85,46
25	50	1,931	1,512	1,452	85,46	86,05
50	100	1,885	1,452	1,344	86,05	86,64
100	200	1,802	1,344	1,167	86,64	87,23
200	400	1,666	1,167	0,958	87,23	87,82
400	800	1,505	0,958	0,722	87,82	88,41

$\sigma_i - u_w$ kPa	C_{cw}	H_{gi} cm	H_{gf} cm	u_{gi} kPa	u_{gf} kPa	B_g
1	0,032	0,213	0,177	11,00	33,36	2,03
12	0,173	0,183	0,167	12,00	22,87	0,84
25	0,199	0,169	0,154	25,00	37,68	0,51
50	0,359	0,156	0,135	50,00	72,81	0,46
100	0,588	0,138	0,111	100,00	148,68	0,49
200	0,696	0,115	0,086	200,00	298,99	0,49
400	0,784	0,090	0,061	400,00	635,61	0,59

h) Traçado da curva compressibilidade

A partir dos valores de $\sigma_v - u_w$ e e_{wf} obtidos na Tabela 9 pode-se traçar a curva de compressibilidade mostrada na Figura 7:

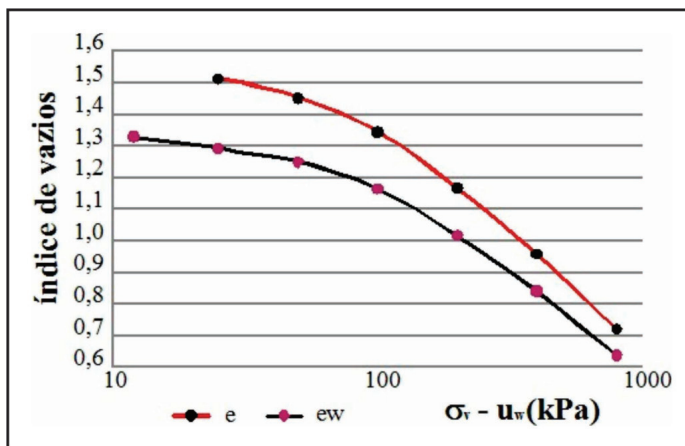


Figura 7 – Curva de Compressibilidade

k) Índice de compressão C_{cw}

Escolhem-se dois pontos no trecho reto da curva de compressibilidade. Esses pontos têm as coordenadas $((\chi\rho'_{v1} - u_w), e_{w1})$ e $((\chi\rho'_{v2} - u_w), e_{w2})$. Com esses valores aplica-se a Equação 22:

$$\Delta e_w = C_{cw} \log \frac{(\sigma_{v2} - u_w)}{(\sigma_{v1} - u_w)}$$

$$C_{cw} = - \frac{e_{w2} - e_{w1}}{\log \frac{(\sigma_{v2} - u_w)}{(\sigma_{v1} - u_w)}} = - \frac{0,841 - 1,018}{\log \frac{200}{100}} = 0,486 \quad (\text{Eq. 54})$$

4.2 Recalque no campo

Achar os recalques que ocorrerão na camada mostrada na Figura 8, sob um carregamento de 100 kPa, sabendo-se que a amostra ensaiada apresentada no problema anterior foi retirada no meio da camada argilosa. Fazer a previsão do recalque para 10 anos.

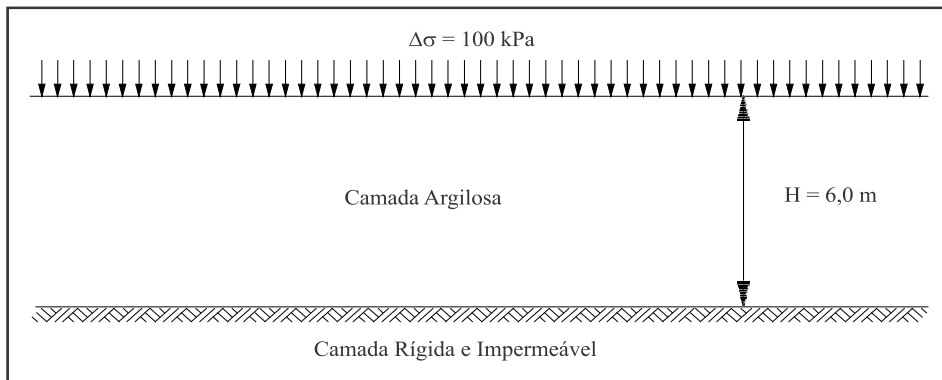


Figura 8 – Perfil da camada

A altura inicial de gás na camada é calculada com a equação 13:

$$H_{go} = \frac{H_o e_o (1 - S_o)}{1 + e_o} = \frac{6 \times 1,602 \left(1 - \frac{82,73}{100}\right)}{1 + 1,602} = 0,64 \text{ m}$$

Pode-se então achar o recalque da camada devido à compressão dos gases através da equação 23:

$$\Delta H_g = H_{go} \left(1 - \frac{u_{go} + e_{atm}}{u_{go} + u_{atm} + B_g \Delta \sigma_v}\right) = 0,64 \left(1 - \frac{45,84 + 101,3}{45,84 + 101,3 + 0,41 \cdot 100}\right) = 0,14 \text{ m}$$

Para o cálculo do recalque ao final do adensamento devido à expulsão da água dos vazios, utiliza-se a equação 24:

$$\Delta H_w = \frac{H_o C_{cw} \log \frac{\sigma_{vf}}{\sigma_{vo}}}{1 + e_o} = \frac{(6 - 0,14) 0,486 \log \frac{145,84}{45,84}}{1 + 1,602} = 0,62 \text{ m}$$

O recalque total da camada será obtido com a equação 5:

$$\Delta H_{total} = \Delta H_g + \Delta H_w = 0,14 + 0,56 = 0,70 \text{ m}$$

RECALQUE AOS 10 ANOS

No exemplo em pauta, a variação dos recalques com o tempo pode ser obtida utilizando-se as expressões 30, 31 e a Equação 55, proposta por Sivaram & Swamee (1977), que relaciona o fator tempo com as percentagens de recalques.

$$T = \frac{C_{vw} t}{H_d^2} = \frac{1,85 \cdot 10^{-8} \cdot 10 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 69}{6^2} = 0,170$$

$$U(\%) = \frac{100}{\left[\left(\frac{\pi}{4T} \right)^{2,801} + 1 \right]^{0,179}} = \frac{100}{\left[\left(\frac{\pi}{4 \cdot 0,170} \right)^{2,801} + 1 \right]^{0,179}} = 46,31\% \quad (\text{Eq. 55})$$

$$\Delta H_{10 \text{ anos}} = \Delta H_g + U \Delta H_w = 0,14 + \frac{46,31}{100} 0,56 = 0,40 \text{ m}$$

5. OUTRAS SITUAÇÕES

A aplicação mostrada foi feita para uma argila normalmente adensada. No entanto, não há nenhuma restrição a esse método ser usado em argilas pré-adensadas, uma vez que a separação feita no cálculo entre a matriz saturada e a fase gasosa, faz com que todas as situações admitidas para um solo saturado na teoria de Terzaghi, sejam também admitidas para a matriz saturada. A influência do pré-adensamento na pressão do gás – que ocorre através da estrutura da argila – é levada em conta, uma vez que, o parâmetro $\bar{B}_g$ seria obtido de resultados de ensaios em amostras, que se supõe, representativas da camada pré-adensada. O mesmo pode-se dizer para a condição de sub-adensamento, carregamento por etapas e outras situações em que a teoria de Terzaghi possa ser aplicada.

6. CONCLUSÕES

Os métodos existentes para prever a deformação em solos não saturados são, em geral, de difícil aplicação, exigindo o uso de computadores para achar soluções numéricas para as complexas equações que, quase sempre, necessitam de parâmetros especiais não disponíveis.

Propõe-se aqui um método que tenta aliar à simplicidade de aplicação, o que se espera ser uma precisão aceitável para os problemas reais do dia a dia da engenharia de solos.

Sua principal característica é tratar o processo de adensamento que ocorre na matriz saturada separadamente da deformação imediata que ocorre nas bolhas de gás. Nesse caso, utiliza-se, para a previsão dos recalques por adensamento primário, a teoria unidimensional de Terzaghi e, para a compressão do ar nos vazios, a lei de Boyle. Isso leva a uma previsão mais correta dos recalques diferidos do que a aplicação exclusiva da teoria de Terzaghi como costuma ser feito.

REFERÊNCIAS

- BARDEN, I. (1979). Consolidation of Clays Compacted Dry and Wet of Optimum Moisture Content. *Geotechnique* 24, pp. 605-625.
- BIOT, M. A. (1941). General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*, vol. 12, pp. 155-164.
- BRACKLEY, I. J. A (1975). A Model of Unsaturated Clay Structure and its Application on Swell Behaviour. *Proc. 6th Reg. Conf. for Africa on Soil Mech. and Found. Eng.*, vol. 1, pp. 71-79.
- BODEN D. (1989). The Drained Stress-Strain Behaviour of Gassy Soil. Report to the Committee for Research Students - University of Oxford.
- DAS, B. M. (1997). *Advanced Soils Mechanics*. 2nd Ed. Taylor and Francis, Washington DC.
- DEL DUCA, G. (2015). Programação para Ensaio de Adensamento de Solos Saturados e Não Saturados com Bolhas de Ar Oclusas. Monografia de Projeto Final em Geotecnia, Universidade de Brasília.
- MURRIETA P. (1990a). Utilização da Zeolita para Produzir Amostras com Bolhas de Ar Oclusas. 2^o Trabalho de Qualificação para o D.Sc., COPPE-UFRJ.
- MURRIETA P. (1990b). Compressibilidade de Solos Não Saturados com Bolhas de Ar Oclusas. Tese de DSc, COPPE-UFRJ.
- MURRIETA P. Geotecnia Básica. Em editoração na Editora da UnB.
- NAGESWARAN, S. (1983). Effect of Gas Bubbles on the Seabed Behaviour. D. Phil. Thesis, University of Oxford.
- SCOTT, R. F. (1965). *Principles of Soil Mechanics*. Addison-Wesley, New York.
- SILLS G. C. & NAGESWARAN, S. (1982). The Preparation and Characteristics of Re-constituted Soil Containing Undissolved Gas Bubbles. Univ. of Oxford Dept. Eng. Sci. Report nE SMO 26/82.
- SIVARAM, B. & SWAMEE, A. (1977). A computational method for consolidation coefficient. *Soils and Foundations*, v. 17, n. 2, pp. 48-52.
- SKEMPTON, A. W. (1954). The Pore Pressure Coefficient A and B. *Geotechnique* 4, vol. 4, pp. 143-147.

TAYLOR, D. W. (1942). Research on Consolidating Clay. Dep. Eng. Civ. MIT Serial 82.

THOMAS, S. D. (1987). The Consolidation Behaviour of Gassy Soil. D. Phil. Thesis, Oxford University.

WHEELER, S. J. (1986b). The Stress-Strain Behaviour of Soils Containing Gas Bubbles. D. Phil. Thesis, Oxford University.