

PAOLA PIRFO LIMA

**ENSAIOS OEDOMÉTRICOS COM TAXA DE DESLOCAMENTO
CONSTANTE EM SOLOS MUITO MOLES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL**

1996

PAOLA PIRFO LIMA

**ENSAIOS OEDOMÉTRICOS COM TAXA DE DESLOCAMENTO
CONSTANTE EM SOLOS MUITO MOLES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

APROVADA: 29 de março de 1996.

Prof. Benedito de Souza Bueno
(Conselheiro)

Prof. Enivaldo Minette
(Conselheiro)

Prof.^a Izabel C. D. de Azevedo

Prof. Márcio Souza Soares de Almeida

Prof. Roberto Franscisco de Azevedo
(Orientador)

A Deus,

A meus pais,

À minhas irmãs,

A meu esposo, Marcos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realização deste curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor Roberto Franscisco de Azevedo, pela orientação e pelo incentivo no decorrer deste trabalho.

Aos professores do setor de Geotecnia da UFV, pelos ensinamentos.

Às secretárias e aos técnicos do Laboratório de Geotecnia da UFV, em especial a Júlio Carlos dos Santos, pela ajuda e dedicação.

Aos colegas de curso, pelo convívio agradável durante esta jornada.

BIOGRAFIA

PAOLA PIRFO LIMA, filha de Ubirajara Lima Filho e Edda Pirfo Lima, nasceu em 25 de maio de 1970, em Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais.

Em 1988, completou o segundo grau no Colégio Santo Antônio, em Belo Horizonte, MG.

Iniciou, em fevereiro de 1989, o Curso de Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Fundação Mineira de Educação e Cultura (FE-FUMEC), em Belo Horizonte, MG, concluindo-o em 15 de dezembro de 1993.

Em março de 1994, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

CONTEÚDO

LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
EXTRATO.....	xv
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Objetivos.....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Ensaio de adensamento com carregamento em estágios.....	5
2.2. Ensaio de adensamento com carregamento contínuo.....	6
2.2.1. Ensaio de adensamento com gradiente controlado (CGC).....	7
2.2.2. Ensaio de adensamento com taxa de carregamento constante (CRL).....	9
2.2.3. Ensaio de adensamento com fluxo restringido (RFC).....	10
2.2.4. Ensaio de adensamento hidráulico (HC).....	11
2.2.5. Ensaio de adensamento com taxa de deslocamento constante (CRD).....	12

3. TEORIA DO ADENSAMENTO COM GRANDES DEFORMAÇÕES..	14
3.1. Sistemas de coordenadas.....	14
3.1.1. Sistema de coordenadas euleriano.....	15
3.1.2. Sistema de coordenadas lagrangeano.....	15
3.1.3. Sistema de coordenadas reduzido.....	16
3.1.4. Transformação de coordenadas.....	18
3.2. Equação diferencial do adensamento com grandes deformações em em coordenadas reduzidas.....	19
3.2.1. Equação de equilíbrio.....	19
3.2.2. Equação da continuidade do sistema.....	20
3.2.3. Princípio das tensões efetivas.....	22
3.2.4. Lei de Darcy-Gersevanov.....	23
3.2.5. Relações constitutivas do material.....	24
3.2.6. Montagem da equação diferencial do adensamento com grandes deformações.....	24
4. MÉTODOS DE ANÁLISE DO ENSAIO CRD UTILIZADOS NO TRABALHO.....	29
4.1. Análise de Znidarcic e de outros (1986).....	29
4.2. Análise simplificada.....	37
4.2.1. Cálculo do $\sigma^l_{\text{médio}}$	38
4.2.2. Cálculo do $e_{\text{médio}}$	39
4.2.3. Cálculo do $k_{\text{médio}}$	40
5. DESCRIÇÃO DO OEDÔMETRO TIPO CRD DESENVOLVIDO.....	45
5.1. Descrição do oedômetro tipo CRD.....	45
5.1.1. Base da célula oedométrica.....	47
5.1.2. Câmara oedométrica.....	47
5.1.3. Topo do oedômetro.....	50
5.1.4. Pistão.....	50
5.2. Prensa de ensaio e viga de reação.....	50
5.3. Instrumentação.....	50
5.4. Procedimento de ensaio.....	51

6. DESCRIÇÃO DO MATERIAL, APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	57
6.1. Características do material ensaiado.....	57
6.1.1. Ensaio de caracterização.....	58
6.2. Ensaio de adensamento tipo CRD realizados.....	60
6.2.1. Análise da influência da velocidade.....	62
6.2.2. Análise da influência do teor de umidade inicial.....	74
6.2.3. Análise da influência da contrapressão.....	86
6.2.4. Análise da influência da altura da amostra.....	93
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	101
7.1. Conclusões.....	101
7.2. Sugestões.....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104

LISTA DE QUADROS

Quadro	Pág.
1. Resumo das características geotécnicas da amostra de rejeito da mina da Mutuca.....	58
2. Resumo dos ensaios oedométricos tipo CRD realizados.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pág.
1. Sistema de coordenadas euleriano.....	15
2. Sistema de coordenadas lagrangeano.....	16
3. Sistemas de coordenadas euleriano, lagrangeano e reduzido.....	17
4. Configuração de um elemento de solo.....	18
5. Equilíbrio de um elemento de solo.....	19
6. Continuidade de um elemento de solo.....	22
7. Detalhe das oscilações nas curvas de laboratório.....	36
8. Distribuição simplificada da poro-pressão e da tensão efetiva com a profundidade.....	37
9. Variação do índice de vazios.....	39
10. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Argila fosfática da Flórida.....	42
11. Curvas $e \times \sigma^l$ - Análise simplificada e teórica (ZNIDARCIC, 1986).....	43
12. Curvas $e \times k$ - Análise simplificada e teórica (ZNIDARCIC, 1986).....	43
13. Corte transversal do oedômetro tipo CRD.....	46
14. Base do oedômetro.....	47
15. Anéis superior e inferior da câmara oedométrica.....	48
16. Topo do oedômetro e pistão.....	49
17. Amostra do rejeito da mina da Mutuca a ser ensaiada.....	52

18. Montagem da base na prensa.....	53
19. Colocação do anel inferior e assentamento da amostra.....	54
20. Colocação do anel superior e montagem do topo com o pistão.....	55
21. Sistema preparado para realização do ensaio.....	56
22. Curva granulométrica do rejeito da mina da Mutuca.....	59
23. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 1, 2 e 3: velocidades diferentes.....	62
24. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 1, 2 e 3: velocidades diferentes.....	63
25. Curvas $e \times k$ - Ensaios 1, 2 e 3: velocidades diferentes.....	63
26. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 4, 5, 6 e 7: velocidades diferentes.....	64
27. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 4, 5, 6 e 7: velocidades diferentes.....	65
28. Curvas $e \times k$ - Ensaios 4, 5, 6 e 7: velocidades diferentes.....	65
29. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 9, 10 e 11: velocidades diferentes.....	66
30. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 9, 10 e 11: velocidades diferentes.....	67
31. Curvas $e \times k$ - Ensaios 9, 10 e 11: velocidades diferentes.....	67
32. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 12, 13 e 14: velocidades diferentes.....	68
33. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 12, 13 e 14: velocidades diferentes.....	69
34. Curvas $e \times k$ - Ensaios 12, 13 e 14: velocidades diferentes.....	69
35. Curvas $u_{base} / \sigma \times \sigma^l$ - Ensaios 1, 2 e 3: velocidades diferentes.....	71
36. Curvas $u_{base} / \sigma \times \sigma^l$ - Ensaios 4, 5, 6 e 7: velocidades diferentes.....	72
37. Curvas $u_{base} / \sigma \times \sigma^l$ - Ensaios 9, 10 e 11: velocidades diferentes.....	72
38. Curvas $u_{base} / \sigma \times \sigma^l$ - Ensaios 12, 13 e 14: velocidades diferentes.....	73
39. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 1 e 4: $v = 0,0756$ mm/min.....	74
40. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 1 e 4: $v = 0,0756$ mm/min.....	75
41. Curvas $e/e_o \times \sigma^l$ - Ensaios 1 e 4: $v = 0,0756$ mm/min.....	75
42. Curvas $e \times k$ - Ensaios 1 e 4: $v = 0,0756$ mm/min.....	76
43. Curvas $e/e_o \times k$ - Ensaios 1 e 4: $v = 0,0756$ mm/min.....	76
44. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 2 e 5: $v = 0,150$ mm/min.....	77
45. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 2 e 5: $v = 0,150$ mm/min.....	78
46. Curvas $e/e_o \times \sigma^l$ - Ensaios 2 e 5: $v = 0,150$ mm/min.....	78

47. Curvas $e \times k$ - Ensaios 2 e 5: $v = 0,150$ mm/min.....	79
48. Curvas $e/e_o \times k$ - Ensaios 2 e 5: $v = 0,150$ mm/min.....	79
49. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 3 e 6: $v = 0,301$ mm/min.....	80
50. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 3 e 6: $v = 0,301$ mm/min.....	81
51. Curvas $e/e_o \times \sigma^l$ - Ensaios 3 e 6: $v = 0,301$ mm/min.....	81
52. Curvas $e \times k$ - Ensaios 3 e 6: $v = 0,301$ mm/min.....	82
53. Curvas $e/e_o \times k$ - Ensaios 3 e 6: $v = 0,301$ mm/min.....	82
54. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 8 e 9: $v = 0,0756$ mm/min.....	83
55. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 8 e 9: $v = 0,0756$ mm/min.....	84
56. Curvas $e/e_o \times \sigma^l$ - Ensaios 8 e 9: $v = 0,0756$ mm/min.....	84
57. Curvas $e \times k$ - Ensaios 8 e 9: $v = 0,0756$ mm/min.....	85
58. Curvas $e/e_o \times k$ - Ensaios 8 e 9: $v = 0,0756$ mm/min.....	85
59. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 4 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.....	87
60. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 4 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.....	88
61. Curvas $e \times k$ - Ensaios 4 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.....	88
62. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 5 e 13: $v = 0,150$ mm/min.....	89
63. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 5 e 13: $v = 0,150$ mm/min.....	90
64. Curvas $e \times k$ - Ensaios 5 e 13: $v = 0,150$ mm/min.....	90
65. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 6 e 14: $v = 0,301$ mm/min.....	91
66. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 6 e 14: $v = 0,301$ mm/min.....	92
67. Curvas $e \times k$ - Ensaios 6 e 14: $v = 0,301$ mm/min.....	92
68. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 9 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.....	94
69. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 9 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.....	95
70. Curvas $e \times k$ - Ensaios 9 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.....	95
71. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 10 e 13: $v = 0,150$ mm/min.....	96
72. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 10 e 13: $v = 0,150$ mm/min.....	97
73. Curvas $e \times k$ - Ensaios 10 e 13: $v = 0,150$ mm/min.....	97
74. Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 11 e 14: $v = 0,301$ mm/min.....	98
75. Curvas $e \times \sigma^l$ - Ensaios 11 e 14: $v = 0,301$ mm/min.....	99
76. Curvas $e \times k$ - Ensaios 11 e 14: $v = 0,301$ mm/min.....	99

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - Coordenada lagrangeana
- a_o - Coordenada lagrangeana inicial
- a_v - Coeficiente de compressibilidade (kPa^{-1})
- A - Área da seção transversal da amostra (m^2)
- c_v - Coeficiente de adensamento (m^2 / s)
- C_u - Coeficiente de uniformidade
- D - Deslocamento adimensional
- D_{10} - Diâmetro efetivo (m)
- D_{60} - Diâmetro para o qual 60% do solo, em massa, tem diâmetro menor que ele (m)
- e - Índice de vazios
- e_o - Índice de vazios inicial
- E - Índice de vazios adimensional
- h_z - Volume total de sólidos da camada num determinado instante de tempo
- IP - Índice de plasticidade (%)
- k - Coeficiente de permeabilidade (m / s)
- k_z - Permeabilidade reduzida (m / s)

LL - Limite de liquidez (%)
 LP - Limite de plasticidade (%)
 n - Porosidade
 q - Vazão (m^3 / s)
 R - Taxa de deformação
 t - Tempo (s)
 Δt - Incremento do tempo
 t_{90} - Tempo para 90% de adensamento
 T - Fator tempo
 u_w - Poro pressão total (kPa)
 u_{base} - Poro pressão na base da amostra (kPa)
 u_o - Pressão hidrostática (kPa)
 u - Excesso de poro pressão (kPa)
 v_s - Velocidade dos sólidos (m / s)
 v_w - Velocidade de percolação do poro-fluido (m / s)
 v_z - Velocidade do fluxo postulada por Gersevanov (1934) (m / s)
 v_1 - Velocidade imposta à borda superior (m / s)
 v_2 - Velocidade imposta à borda inferior (m / s)
 V_s - Volume de sólidos (m^3)
 V_v - Volume de vazios (m^3)
 w - Teor de umidade (%)
 z - Coordenada reduzida
 Z - Coordenada adimensional
 γ - Peso específico do solo (kN / m^3)
 γ_s - Peso específico dos sólidos (kN / m^3)
 γ_w - Peso específico do fluido (kN / m^3)
 ε - Deformação
 ξ - Coordenada euleriana

ξ_o - Coordenada euleriana inicial

σ - Tensão total (kPa)

σ^I - Tensão efetiva (kPa)

EXTRATO

LIMA, Paola Pirfo, M.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 1996.
Ensaio oedométrico com taxa de deslocamento constante em solos muito moles. Professor Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Professores Conselheiros: Benedito de Souza Bueno e Enivaldo Minette.

Neste trabalho são descritos o desenvolvimento e a utilização de um equipamento para realização de ensaios de adensamento com taxa de deslocamento constante em solos muito moles. Inicialmente, faz-se uma revisão dos diferentes tipos de ensaio de adensamento, destacando-se aquele com taxa de deslocamento constante. Em seguida, apresenta-se a teoria do adensamento com grandes deformações, desenvolvida por Gibson et al. (1967), juntamente com os diversos sistemas de coordenadas. Com base nesta teoria, subsequentemente apresenta-se o método de análise para o ensaio CRD proposto por Znidarcic et al., 1986. Em razão das dificuldades encontradas na utilização deste método, descreve-se também um outro mais simples, adotado nesta tese. Em seguida, apresentam-se as características básicas do material utilizado, ou seja, o rejeito da mina da Mutuca, os ensaios realizados, bem como os resultados obtidos e a discussão sobre a influência de vários aspectos como: teor de umidade inicial da amostra; velocidade de ensaio; contrapressão; e altura da amostra etc.

Finalmente, são feitas algumas conclusões, destacando-se a simplicidade e o bom desempenho do equipamento desenvolvido, e a pequena influência da velocidade, da altura da amostra e da contrapressão nos resultados dos ensaios.

ABSTRACT

LIMA, Paola Pirfo, M.S., Federal University of Viçosa, august, 1996.
Constant rate of deformation oedometer tests on very soft soils. Adviser:
Roberto Francisco de Azevedo. Committee Members: Benedito de Souza
Bueno and Enivaldo Minette.

This work deals with the development and use of a new constant rate of deformation (CRD) oedometer made to test very soft materials. At first, different types of oedometer test are reviewed, with emphasis in the constant rate of deformation type. Following, the large strains consolidation theory developed by Gibson et al. (1967) is presented, together with different types of coordinate systems. Based on this theory, the next chapter presents the CRD test analysis proposed by Znidarcic et al., 1986. Due to difficulties encountered using this analysis, another simpler analysis is also described and was adopted in this thesis. Following, the testing program performed is shown. The basic features of the material used, tailings of the Mutuca mine, and the tests executed are presented, together with the results obtained and discussions about the influence of several aspects like: initial water content of the samples; velocity of the tests; back-pressure; and sample height etc. Finally some conclusions are made, emphasizing the simplicity and well functioning of the equipament developed,

and the little influence of velocity, sample height and back-pressure on the test results.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

A necessidade de uma exploração contínua de recursos minerais para manter o progresso tecnológico tem contribuído para que o armazenamento de rejeitos se torne um problema crescente, principalmente do ponto de vista de conservação ambiental.

Apenas no Brasil, até 1985, foram gerados 160 milhões de toneladas de rejeitos na produção de 21 minerais que representam 91% da produção brasileira (VILLAR, 1990).

Dessa forma, muitos pesquisadores têm-se preocupado em conhecer o comportamento desses rejeitos em forma de lama, para dimensionar os reservatórios, nos quais estes são normalmente lançados, e, além disso, planejar a estabilização do solo e estudar uma futura utilização do aterro gerado.

No lançamento destes rejeitos inicia-se um processo de deposição que envolve sedimentação em conjunto com o adensamento, em virtude do peso próprio do material.

KYNCH (1952) desenvolveu uma teoria de sedimentação unidimensional, na qual supôs que a velocidade de queda das partículas é

determinada pela densidade em cada ponto e, desta forma, estabeleceu uma equação de continuidade para representar a sedimentação de uma dispersão.

Quanto ao adensamento, a teoria proposta por TERZAGHI e FRÖHLICH (1936) não se aplica no processo de adensamento de solos muito moles (lamas), em virtude da não linearidade tanto geométrica (grandes deformações) quanto física (relações constitutivas do material não-lineares).

Para solucionar este problema, foi desenvolvida uma teoria de adensamento unidimensional com grandes deformações, que considera as não-linearidades física e geométrica e admite que ocorre adensamento em razão do peso próprio do material (MIKASA, 1963; GIBSON et al., 1967; SCHIFFMAN et al., 1984 e SCHIFFMAN, 1987).

SCHIFFMAN et al. (1984) propuseram uma mudança no princípio das tensões efetivas de tal forma que, utilizando as equações de continuidade e equilíbrio, fosse formulada uma teoria que atendesse, simultaneamente, aos processos de sedimentação e adensamento.

A equação de sedimentação e adensamento contém duas propriedades fundamentais do material: a relação entre a tensão efetiva e o índice de vazios (compressibilidade) e entre a permeabilidade e o índice de vazios.

Existem diferentes tipos de ensaios, chamados oedométricos, para se obter estas propriedades em laboratório. Entretanto, tanto a compressibilidade, quanto a permeabilidade não são, normalmente, medidas diretamente, pois requerem uma interpretação do ensaio por meio de alguma teoria.

Freqüentemente, os ensaios oedométricos são analisados a partir da teoria unidimensional de TERZAGHI e FRÖHLICH (1936). Entretanto, ZNIDARCIC et al. (1986) propuseram uma interpretação do ensaio oedométrico com taxa de deslocamento constante, com base na teoria de adensamento com grandes deformações.

Em face do exposto nesta introdução, são apresentados a seguir objetivos desta pesquisa.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver um equipamento para a realização de ensaios oedométricos com taxa de deslocamento constante em lamas, semelhante ao desenvolvido por ZNIDARCIC et al. (1986) e GUIMARÃES FILHO (1990). Objetivou-se, também, utilizar a interpretação proposta por ZNIDARCIC et al. (1986) e obter parâmetros de compressibilidade e permeabilidade de solos moles consistentes para serem aplicados na teoria de adensamento com grandes deformações na análise do enchimento de reservatórios de barragens de rejeitos (TERRA PINTO, 1988 e AZEVEDO e SADO, 1990).

2. REVISÃO DE LITERATURA

Foram desenvolvidos, durante as três últimas décadas, vários tipos de ensaios de adensamento com o objetivo de suprir algumas limitações do ensaio convencional com carregamento em estágios (TERZAGHI, 1927). Estes incluem o ensaio de adensamento com taxa de deslocamento constante (SMITH e WAHLS, 1969 e WISSA et al., 1971); o ensaio de adensamento com gradiente controlado (LOWE et al., 1969); o ensaio de adensamento com taxa de carregamento constante (ABOSHI et al., 1970); o ensaio de adensamento com fluxo restringido (LEE, 1981); o ensaio de adensamento hidráulico (IMAI, 1979), dentre outros.

Os ensaios de adensamento fornecem informações básicas a respeito das características de compressibilidade e permeabilidade do solo para uso no cálculo da evolução do recalque com o passar do tempo.

A escolha do ensaio mais adequado depende do problema analisado, uma vez que ele deve representar, o mais próximo possível, as condições de campo para se obter uma aplicação direta dos resultados.

A seguir, serão apresentados os equipamentos e os procedimentos utilizados na realização de cada um dos ensaios citados anteriormente (OLSON, 1986; ALMEIDA, 1988; CARVALHO, 1989 e GUIMARÃES FILHO, 1990).

2.1. Ensaio de adensamento com carregamento em estágios

Também conhecido como ensaio de adensamento convencional, o ensaio de adensamento com carregamento em estágios foi proposto inicialmente por TERZAGHI (1927), sendo até agora o mais utilizado nos laboratórios de geotecnia. Este ensaio baseia-se na teoria de adensamento, desenvolvida por TERZAGHI e FRÖHLICH (1936), procurando representar as condições impostas por suas hipóteses.

O equipamento usado neste ensaio consta de um anel metálico, com diâmetro bem maior que a altura, de uma célula de adensamento, com pedras porosas para drenagem do corpo de prova, de uma prensa e de um extensômetro.

A realização do ensaio consiste basicamente em se colocar a amostra no interior do anel metálico, e o conjunto dentro de uma célula de adensamento, onde o corpo-de-prova é confinado, no topo e na base, por duas pedras porosas.

A célula é então levada à prensa, sendo aplicadas tensões verticais ao corpo-de-prova em vários estágios de carregamento. Cada estágio permanece atuando até que cessem as deformações originadas pelo carregamento, normalmente, vinte e quatro horas. Passa-se então para o estágio seguinte, aumentando o carregamento, em geral para o dobro do carregamento aplicado no estágio anterior.

Durante o ensaio, o corpo-de-prova é drenado pelas faces superior e inferior, sendo feitas medidas da deformação vertical ao longo do tempo, para cada estágio de carregamento.

Para cada estágio, por meio das curvas $\varepsilon \times \sqrt{t}$ ou $\varepsilon \times \text{Log} t$, determinam-se o coeficiente de adensamento (c_v) e, conseqüentemente, a sua variação com o índice de vazios.

No final de todos os estágios obtém-se a variação do índice de vazios com a tensão efetiva (compressibilidade).

A variação da permeabilidade com o índice de vazios é obtida indiretamente a partir de c_v e da curva de compressibilidade.

O ensaio convencional é considerado um dos mais demorados, durando em média de uma a duas semanas, provavelmente sua mais significativa desvantagem.

Além disso, o ensaio em questão não se aplica a solos muito moles, com alto teor de umidade inicial, pois não existe nenhum dispositivo que vede a passagem de sólidos.

Finalmente, o ensaio é interpretado à luz da teoria de adensamento com pequenas deformações, não sendo prudente utilizá-lo para obter parâmetros para problemas que envolvam adensamento com grandes deformações.

Apesar destes fatores, o equipamento utilizado é simples e a grande experiência adquirida com o ensaio facilita a execução e análise dos resultados obtidos.

2.2. Ensaio de adensamento com carregamento contínuo

Os ensaios de adensamento com carregamento contínuo, descritos a seguir, requerem células especiais e medições de excesso de poro-pressão, em geral, efetuadas na base. Normalmente ocorre drenagem na face superior.

2.2.1. Ensaio de adensamento com gradiente controlado (CGC)

O ensaio de adensamento com gradiente controlado requer um equipamento especial que permita aplicar uma contrapressão, manter uma diferença de poro-pressão constante entre o topo e a base do corpo-de-prova e variar a taxa de carregamento aplicado no corpo-de-prova.

Para realização do ensaio utilizam-se, normalmente, corpos-de-prova cilíndricos, semelhantes àqueles usados no ensaio de adensamento convencional.

A drenagem é total apenas na face superior do corpo-de-prova, pois, na inferior, é mantido um excesso de poro-pressão pequeno e constante, pela aplicação gradual do carregamento. Sob estas condições de contorno desenvolve-se uma distribuição do excesso de poro-pressão, que varia do valor mantido na base do corpo-de-prova até zero no topo drenado. Esta distribuição permanece mais ou menos constante durante todo o ensaio, exceto no início e no fim da aplicação do carregamento.

Dessa forma, não se conhece, a princípio, a taxa de carregamento, uma vez que esta deve ser ajustada ao longo do ensaio com o objetivo de manter a poro-pressão constante na face não-drenada.

O corpo-de-prova no interior do anel confinante é colocado dentro de uma câmara capaz de suportar uma contrapressão elevada (superior a 1055 kPa segundo LOWE et al., 1969), que garante a saturação completa do corpo-de-prova para realização do ensaio.

Quando o excesso de poro-pressão na base atinge um valor preestabelecido (entre 5.63 kPa e 28.15 kPa, segundo LOWE et al., 1969), este é mantido por um carregamento contínuo do corpo-de-prova, ou seja, sempre que este valor varia, um dispositivo controlador faz com que a carga seja ajustada, de forma a manter constante o valor desejado. A diferença de pressão agindo entre a

base e o topo causa percolação na direção do topo e o adensamento do corpo-de-prova.

O tempo de leitura pode ser tomado em qualquer intervalo. Geralmente, no início do ensaio são efetuadas leituras a todo minuto. Posteriormente, elas podem ser feitas a cada dez, vinte minutos ou mais.

Durante o ensaio registram-se a deformação da amostra, o valor da poro-pressão constante na base da amostra e a variação do carregamento com o tempo.

A partir destas informações obtêm-se a curva de compressibilidade por meio dos valores médios de tensão efetiva e do índice de vazios na amostra, a variação do coeficiente de adensamento e, por intermédio destas duas variações, a da permeabilidade com o índice de vazios (LOWE et al., 1969).

Pelo método de análise do ensaio proposto por LOWE et al. (1969), deduz-se que o peso próprio não causa adensamento e que a permeabilidade e o coeficiente de compressibilidade são independentes da posição.

O ensaio de adensamento com gradiente controlado pode ser executado com baixas taxas de deformação, sendo estas taxas ainda mais elevadas que aquelas no campo, porém mais representativas que as do ensaio convencional. Além disso, a possibilidade de variação das velocidades de deformação permite o estudo do seu efeito no processo de adensamento.

Para que as hipóteses introduzidas na análise sejam satisfeitas, proporcionando resultado satisfatório, o excesso de poro-pressão na face não drenada deve ser mantido o mais baixo possível. Em geral, para que isso ocorra é necessário que a velocidade de carregamento aplicada à amostra seja baixa, o que leva a um ensaio lento e, conseqüentemente, desvantajoso.

A interpretação do ensaio é feita à luz da teoria do adensamento com pequenas deformações, não sendo prudente utilizá-lo na obtenção dos parâmetros para problemas que envolvem adensamento com grandes deformações.

2.2.2. Ensaio de adensamento com taxa de carregamento constante (CRL)

O princípio básico deste ensaio consiste em submeter a amostra a um carregamento tal que sua taxa de aplicação seja mantida constante com o passar do tempo. A utilização de um motor em conjunto com uma série de engrenagens possibilita a escolha da velocidade de carregamento mais adequada, de modo que o ensaio possa terminar entre duas e três horas (ABOSHI et al., 1970).

O corpo-de-prova cilíndrico pode ter suas dimensões que variam de acordo com a prensa e o anel projetado. Normalmente, é utilizada uma altura inicial de 2 cm (ABOSHI et al., 1970 e JANBU et al., 1981). A base do oedometro é impermeável, mas contém uma pequena pedra porosa com um transdutor instalado para se medir a poro-pressão. O corpo-de-prova é drenado pelo topo e pode ser saturado pela aplicação de contrapressão por meio de uma ou ambas as extremidades.

A unidade de controle registra a deformação do corpo-de-prova, a carga aplicada e a poro-pressão gerada na face não-drenada.

ABOSHI et al. (1970) obtiveram uma solução exata da equação do adensamento com taxa de carregamento constante. A partir desta solução, encontram-se valores do fator de tempo em virtude do carregamento aplicado e da poro-pressão na base não-drenada, para cada instante de tempo do ensaio. Com estes diversos valores de fator de tempo, obtêm-se valores do coeficiente de adensamento (c_v).

A curva de compressibilidade é obtida de forma análoga à descrita no ensaio de gradiente controlado e, a partir desta e da variação de c_v , a curva de permeabilidade também é obtida de maneira semelhante à do ensaio anterior.

Uma dificuldade encontrada na realização deste ensaio está na falta de critérios definidos para a escolha da velocidade de carregamento a ser utilizada.

Sabe-se, no entanto, que esta velocidade deve ser baixa o suficiente para que a distribuição de índice de vazios e da tensão efetiva seja o mais uniforme possível. Dessa maneira, a maior vantagem deste ensaio, que está no tempo reduzido, é perdida, como ocorre no ensaio com gradiente controlado.

Como nos ensaios anteriores, o ensaio de adensamento com taxa de carregamento constante é interpretado à luz da teoria do adensamento com deformações infinitesimais, o que o torna pouco consistente para problemas que envolvem adensamento com grandes deformações.

2.2.3. Ensaio de adensamento com fluxo restringido (RFC)

Este ensaio, idealizado inicialmente por Lee (GUIMARÃES FILHO, 1990 e BARBOSA et al., 1993), consiste em se aplicar a tensão total, lentamente ou através de incrementos de tensão, no topo da amostra, impedindo a drenagem tanto no topo como na base da amostra. Atingido o nível de tensão desejado, permite-se o fluxo de água numa das faces, sendo a velocidade de drenagem controlada por um restritor de fluxo. Desta forma, assegura-se um pequeno gradiente de pressão entre as faces da amostra.

O restritor de fluxo deve impedir adequadamente o fluxo da água drenada da amostra, ser simples e não deve ser afetado por pequenas bolhas de ar existentes na água. Também deve apresentar permeabilidade bem menor que a do material ensaiado. Um restritor de fluxo utiliza uma seqüência de papel-filtro com poros milimétricos condensados por um prendedor adequado. O número de filtros pode variar, proporcionando diferentes quantidades de restrição (SILLS et al., 1986).

Uma vez atingida a tensão total requerida, a linha de drenagem é aberta e a poro-pressão começa a dissipar. Medições da tensão total são feitas por um

transdutor de pressão montado na base da célula, conectado através de um furo à pedra porosa da base. Também são medidos o deslocamento vertical e as poro-pressões no topo e na base da amostra.

A tensão efetiva pode ser calculada a partir da poro-pressão média e da tensão total e o índice de vazios pela altura atual do corpo-de-prova.

Em virtude da restrição do fluxo imposta neste ensaio, não se pode avaliar a permeabilidade do material (ALVES, 1992).

É importante que se consiga um bom desempenho do restritor de fluxo utilizado, sendo este o principal problema do ensaio, uma vez que não se dispõem de critérios bem definidos para tal escolha.

2.2.4. Ensaio de adensamento hidráulico (HC)

O ensaio de adensamento hidráulico consiste em se submeter uma amostra de solo a um fluxo induzido por uma diferença de carga constante. Nesta situação, cada elemento da amostra fica sujeito a forças de percolação que induzem um processo de adensamento na amostra. Após o término deste processo de adensamento fica estabelecida uma condição de fluxo permanente, na qual a tensão efetiva e o teor de umidade (índice de vazios) variam em cada ponto da amostra (IMAI, 1979).

Durante o ensaio, medindo-se as distribuições de poro-pressão, o teor de umidade na amostra e a vazão de poro-líquido que passa pela amostra, consegue-se determinar as curvas de compressibilidade e permeabilidade do corpo-de-prova (IMAI, 1979).

2.2.5. Ensaio de adensamento com taxa de deslocamento constante (CRD)

No ensaio de adensamento com taxa de deslocamento constante, mantem-se fixa uma das faces da amostra (geralmente o topo), enquanto atribui-se um deslocamento com velocidade constante à outra. Desta forma, a amostra fica submetida a um carregamento variável, crescente com o tempo.

O ensaio é simples, não necessita de um sistema de aplicação de carga ou de controle sofisticado, e é realizado utilizando-se uma prensa de carregamento com controle de velocidade habitualmente encontrada nos laboratórios de geotecnia.

O corpo-de-prova é colocado dentro de uma câmara cilíndrica e carregado pela ação do pistão móvel.

Uma das faces do corpo-de-prova, normalmente a base, não é drenada, enquanto a outra o é. Durante o ensaio são medidas a deformação vertical, a tensão axial gerada no topo do corpo-de-prova e a poro-pressão desenvolvida na base do corpo-de-prova. Com os dados obtidos calculam-se a tensão efetiva, o índice de vazios e a permeabilidade para cada instante, determinando-se a variação da compressibilidade e da permeabilidade do solo com o índice de vazios.

Para garantir a saturação da amostra e do sistema, normalmente aplica-se a ela uma contrapressão.

Ainda não se dispõe de um critério bem definido para determinar a velocidade do ensaio. No entanto, a maioria dos métodos utilizados para se prever esta velocidade consideram a razão entre a poro-pressão na base e a tensão total aplicada, u_{base} / σ . SMITH e WAHLS (1969) sugeriram que o valor máximo da razão u_{base} / σ fosse 50%; WISSA et al. (1971) recomendaram uma razão u_{base} / σ na faixa de 2% a 5%; GORMAN et al. (1978) propuseram que a razão

u_{base} / σ fosse inferior a 32% e que o valor de u_{base} sempre ultrapassasse 7 kPa. CARVALHO et al. (1993) propuseram uma forma de determinar a velocidade a partir dos resultados obtidos em uma etapa de carregamento do ensaio convencional.

Como métodos de análise propostos para o ensaio CRD, podem-se citar: a análise de SMITH e WAHLS (1969), que considera desprezível o efeito do peso próprio do material no adensamento e supõe deformações infinitesimais; as análises de WISSA et al. (1971); UMEHARA e ZEN (1980) e LEE (1981), que também não levam em consideração o efeito do peso próprio e admitem que a permeabilidade e o coeficiente de compressibilidade são constantes, sendo adotadas deformações infinitesimais na primeira e deformações finitas nas outras duas (GUIMARÃES FILHO, 1990).

O ensaio CRD, como os de carregamento contínuo citados anteriormente, é provavelmente a solução para laboratórios mais bem equipados no que diz respeito aos ensaios de adensamento, em razão do tempo de ensaio reduzido e da possibilidade de automatização integral.

Observa-se, porém, que com exceção das análises propostas por UMEHARA e ZEN (1980) e LEE, (1981), em todas as outras eram supostas deformações infinitesimais. Por outro lado, estas duas análises, apesar de admitirem que ocorrem grandes deformações, supunham coeficiente de adensamento constante e comportamento predefinido para a deformabilidade do material .

Dessa forma, o método de análise do ensaio proposto por ZNIDARCIC et al. (1986) destaca-se dos demais porque, além de supor grandes deformações, não apresenta o coeficiente de adensamento, c_v , como constante e nem pressupõe um comportamento predefinido para a deformabilidade do material.

3. TEORIA DO ADENSAMENTO COM GRANDES DEFORMAÇÕES

O processo de adensamento de solos muito moles gera grandes deformações, limitando o uso da teoria de adensamento de TERZAGHI e FRÖHLICH (1936), que apresenta como hipóteses básicas, dentre outras:

- (a) Linearidade do comportamento do solo (c_v constante);
- (b) Pequenas deformações (geometria permanece constante);
- (c) Ausência de adensamento, em razão do peso próprio do material; e
- (d) Carregamento constante com o passar do tempo.

Dessa forma, foi desenvolvida uma teoria de adensamento com grandes deformações (MIKASA, 1963 e GIBSON et al., 1967), que admite a não-linearidade física do material (hipótese 1) e geométrica (hipótese 2) e considera o adensamento em virtude do peso próprio (hipótese 3).

3.1. Sistemas de coordenadas

Há dois sistemas de coordenadas fundamentais utilizados na análise do problema da não-linearidade geométrica: o de coordenadas euleriano, mais empregado na engenharia geotécnica, e o de coordenadas lagrangeano.

Na teoria unidimensional do adensamento com grandes deformações é comum se utilizar um tipo particular de sistema de coordenadas lagrangeano, denominado sistema de coordenadas reduzido, que simplifica a solução numérica do problema (ALVES e ESPERANÇA, 1995).

3.1.1. Sistema de coordenadas euleriano

No sistema de coordenadas euleriano, as deformações são relacionadas a um sistema de eixos fixo em relação ao tempo. Assim, a coordenada euleriana “ ξ ” de uma partícula qualquer do esqueleto sólido é função do tempo e varia à medida que o adensamento avança, como esquematizado na Figura 1.

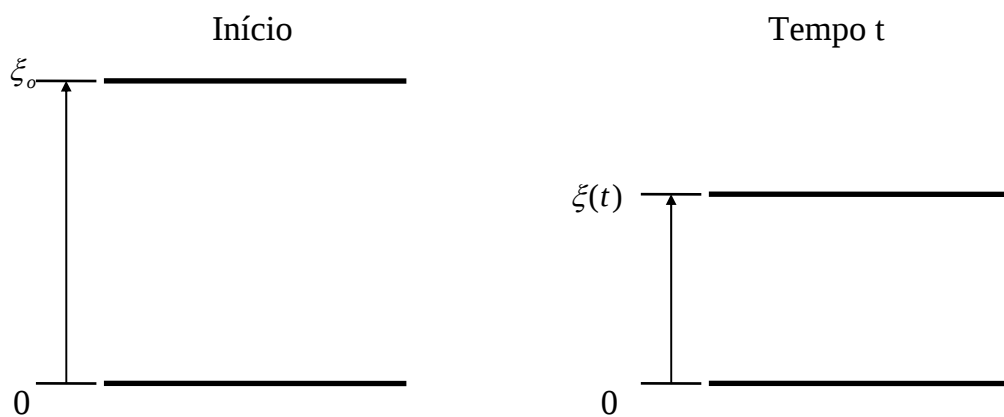


Figura 1 - Sistema de coordenadas euleriano.

3.1.2. Sistema de coordenadas lagrangeano

Neste sistema de coordenadas, as partículas em movimento são identificadas, em qualquer instante, por meio de suas coordenadas iniciais. Dessa forma, a coordenada lagrangeana “ a ” de uma dada partícula torna-se

independente do tempo, apesar de ela estar mudando de posição. Esta situação pode ser visualizada na Figura 2.

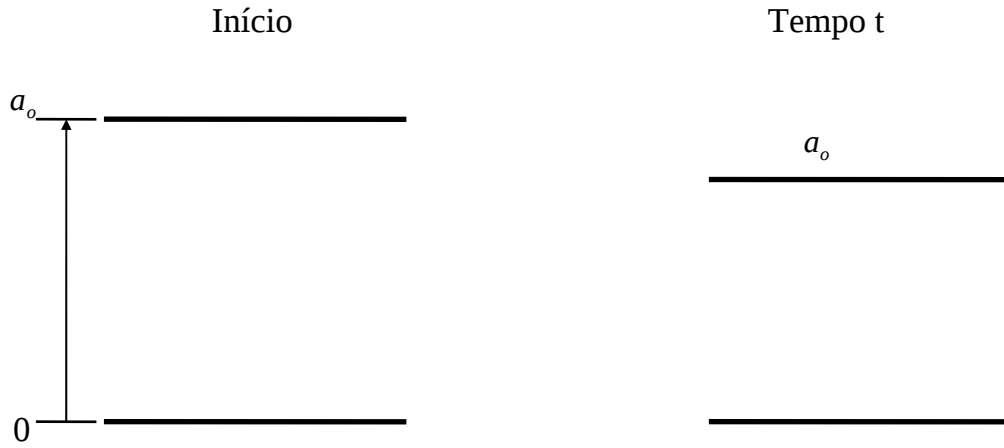


Figura 2 - Sistema de coordenadas lagrangeano.

3.1.3. Sistema de coordenadas reduzido

O sistema de coordenadas reduzido, tipo particular de sistema de coordenadas lagrangeano, é útil na análise de problemas de adensamento com grandes deformações. Neste sistema, a coordenada de uma partícula é definida como o volume de partículas sólidas contidas entre um plano de referência, geralmente a base da camada, e o ponto de coordenada lagrangeana a ser analisado.

A coordenada reduzida de um ponto com coordenada lagrangeana “ a ” é dada por

$$z(a) = \int_0^a \frac{da}{1 + e(a,0)} \quad (1)$$

em que $e(a,0)$ representa a distribuição de índice de vazios no início do processo de adensamento ($t=0$).

Apesar de a coordenada reduzida “ z ” representar um volume, ela tem dimensão de comprimento, uma vez que se considera a área da seção transversal unitária.

A definição e a aplicação da coordenada reduzida baseiam-se no fato de os grãos do solo serem considerados incompressíveis e de a velocidade de percolação ser baixa, não ocorrendo carreamento de partículas. Assim, o peso específico dos sólidos é constante e o volume total de grãos é sempre conhecido durante o adensamento, gerando problema de contornos fixos.

A Figura 3 apresenta um esquema, com valores aleatórios, dos três tipos de coordenadas mencionados anteriormente. A Figura 3 (a) corresponde à situação inicial da camada em processo de adensamento ($t = 0$), definida em cada sistema (ξ , a , e z), enquanto a Figura 3 (b) representa a mesma camada, após um intervalo qualquer de tempo ($t > 0$).

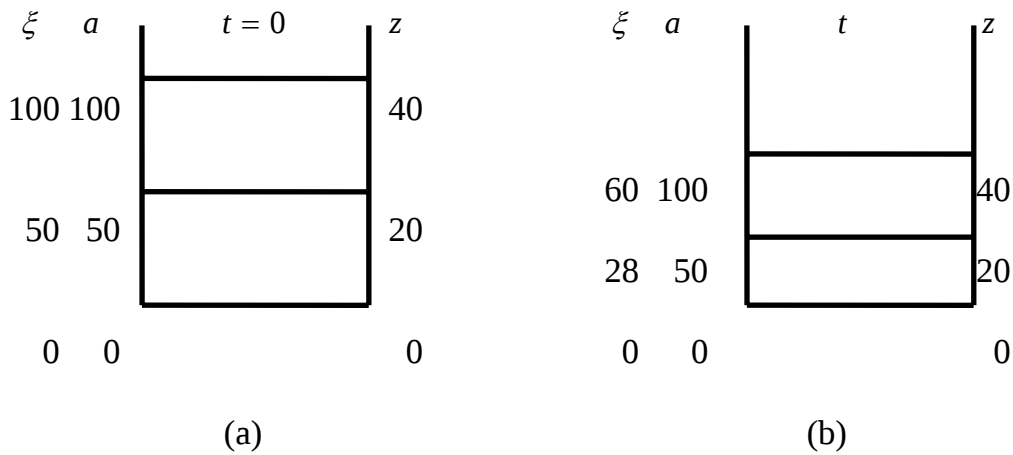


Figura 3 - Sistemas de coordenadas euleriano, lagrangeano e reduzido.

3.1.4. Transformação de coordenadas

A título de simplificação, costuma-se resolver o problema do adensamento com grandes deformações por meio de coordenadas reduzidas. Posteriormente, é feita a transformação para o sistema euleriano ou lagrangeano, que possibilita melhor compreensão do processo físico.

A Figura 4 representa as configurações inicial e deformada de um elemento de solo com volume de sólidos constante e unitário, nas quais se baseiam as relações entre os diversos sistemas de coordenadas citados.

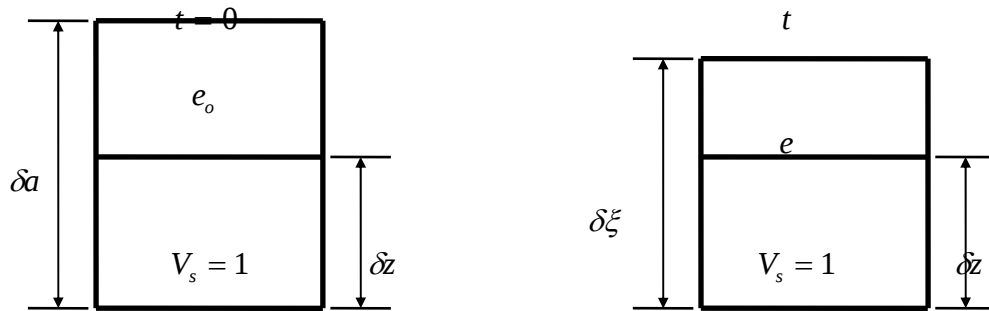


Figura 4 - Configuração de um elemento de solo.

A seguir estão apresentadas as relações entre os sistemas de coordenadas:

- Coordenadas eulerianas e lagrangeanas:
$$\frac{\partial \xi}{\partial a} = \frac{d\xi}{da} = \frac{1 + e(a,t)}{1 + e(a,0)} \quad (2)$$

- Coordenadas eulerianas e reduzidas:
$$\frac{\partial \xi}{\partial z} = \frac{d\xi}{dz} = 1 + e(z,t) \quad (3)$$

- Coordenadas reduzidas e lagrangeanas:
$$\frac{\partial z}{\partial a} = \frac{dz}{da} = \frac{1}{1 + e(a,0)} \quad (4)$$

3.2. Equação diferencial do adensamento com grandes deformações em coordenadas reduzidas

A equação fundamental do adensamento baseia-se nas equações de equilíbrio, da continuidade e nas relações constitutivas do material, apresentadas a seguir.

Na dedução de todas as equações, a coordenada vertical será sempre orientada de cima para baixo.

3.2.1. Equação de equilíbrio

Considere-se o elemento de solo mostrado na Figura 5.

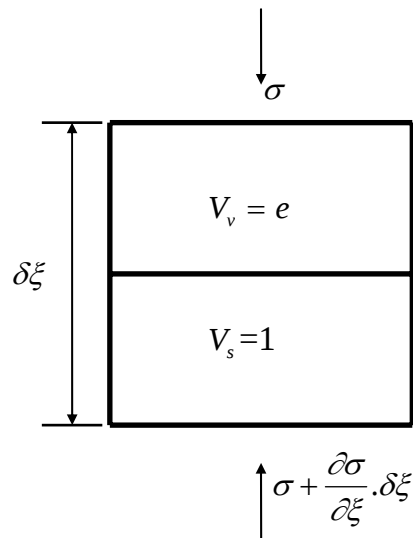


Figura 5 - Equilíbrio de um elemento de solo.

Do equilíbrio de forças na direção vertical conclui-se que

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \cdot d\xi \cdot A - (V_v \cdot \gamma_w + V_s \cdot \gamma_s) = 0 \quad (5)$$

em que A é a área da seção transversal do elemento.

Tendo-se

$$V = V_v + V_s = A \cdot \delta \xi \quad (6)$$

conclui-se que

$$(1 + e) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} - (e \cdot \gamma_w + \gamma_s) = 0 \quad (7)$$

ou, em coordenadas reduzidas, tem-se que

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} - (e \cdot \gamma_w + \gamma_s) = 0 \quad (8)$$

3.2.2. Equação da continuidade do sistema

A continuidade do sistema implica na continuidade do poro-fluido e dos sólidos.

A equação da continuidade do poro-fluido estabelece que a quantidade de fluido que entra menos a quantidade de fluido que sai é igual à variação da de poro-fluido dentro do volume de referência (SCHIFFMAN, 1987), ou seja:

$$\frac{\partial (\gamma_w \cdot n \cdot v_w)}{\partial \xi} + \frac{\partial (\gamma_w \cdot n)}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

em que n é a porosidade e v_w é a velocidade de percolação do poro-fluido.

Analogamente, a equação da continuidade dos sólidos estabelece o balanço dos sólidos dentro do volume de referência e é assim expressa por (SCHIFFMAN, 1987):

$$\frac{\partial[\gamma_s \cdot (1-n) \cdot v_s]}{\partial \xi} - \frac{\partial(\gamma_s \cdot n)}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

em que v_s é a velocidade dos sólidos.

A equação de continuidade do sistema requer, supondo-se que não haja interações químicas de transferência de massa entre o poro-fluido e os sólidos e vice-versa e, considerando γ_w e γ_s constantes, que a soma das equações 9 e 10 seja nula, ou seja:

$$\frac{\partial v_z}{\partial \xi} + \frac{\partial v_s}{\partial \xi} = 0 \quad (11)$$

em que v_z é a velocidade do fluxo postulada por GERSEVANOV (1934) como sendo igual a

$$v_z = n \cdot (v_w - v_s) \quad (12)$$

Em coordenadas reduzidas, com base na Figura 6, a equação de continuidade do sistema (SCHIFFMAN, 1987), equação 11, é escrita como:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

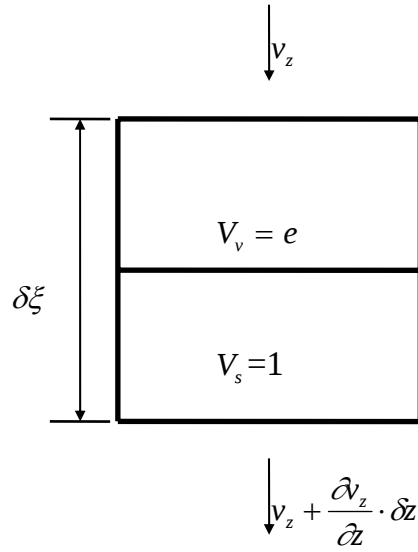


Figura 6 -Continuidade de um elemento de solo.

3.2.3. Princípio das tensões efetivas

Como é sabido, o princípio das tensões efetivas estabelece que

$$\sigma = \sigma' + u_w \quad (14)$$

ou

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{\partial \sigma'}{\partial z} + \frac{\partial u_w}{\partial z} \quad (15)$$

Sendo u_w a poro-pressão total, u_o a pressão hidrostática e u o excesso de poro-pressão, a equação de equilíbrio da fase líquida é dada por:

$$u_w = u_o + u \quad (16)$$

ou

$$\frac{\partial u_w}{\partial \xi} = \frac{\partial u_o}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \xi} \quad (17)$$

Uma vez que a pressão hidrostática varia linearmente com a profundidade, a equação 17 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial u_w}{\partial \xi} = \gamma_w + \frac{\partial u}{\partial \xi} \quad (18)$$

Transformando a equação 18 em sistema de coordenadas reduzidas, tem-se que

$$\frac{\partial u_w}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial z} + \gamma_w \cdot (1 + e) \quad (19)$$

Substituindo a equação 19 na 15, obtém-se a expressão do princípio das tensões efetivas em função do excesso de poro-pressão:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{\partial \sigma'}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z} + \gamma_w \cdot (1 + e) \quad (20)$$

3.2.4. Lei de Darcy-Gersevanov

Na formulação do adensamento com grandes deformações (MIKASA, 1963 e GIBSON et al., 1967) levam-se em consideração a lei de DARCY (1856) modificada, de tal forma que a velocidade superficial do fluxo é considerada igual àquela proposta por GERSEVANOV (1934), ou seja:

$$v_z = n \cdot (v_s - v_w) = \frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial \xi} \quad (21)$$

ou

$$v_z = n \cdot (v_s - v_w) = \frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{1 + e} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \quad (22)$$

em que k é o coeficiente de permeabilidade do solo.

3.2.5. Relações constitutivas do material

São quatro as propriedades do material presente na equação do adensamento com grandes deformações.

Os pesos específicos da água e dos sólidos, respectivamente γ_w e γ_s , que, pela hipótese de incompressibilidade do fluido e das partículas sólidas introduzida no desenvolvimento da teoria, tornam-se constantes.

A permeabilidade foi definida por GIBSON et al. (1967) como função do índice de vazios e e da coordenada reduzida z :

$$k = F(e, z) \quad (23)$$

E a tensão efetiva, uma função do índice de vazios, da coordenada reduzida e do tempo:

$$\sigma^I = G(e, z, t) \quad (24)$$

O fato de a coordenada z ser considerada parâmetro torna as equações 23 e 24 aplicáveis a solos heterogêneos (cuas propriedades variam com a profundidade). Além disso, a introdução da variável independente t na equação 24 permite a consideração de carregamentos não-monotônicos, assim como a consideração de deformação lenta (adensamento secundário).

3.2.6. Montagem da equação diferencial do adensamento com grandes deformações

A seguir é apresentada a dedução da equação do adensamento com grandes deformações em termos do sistema de coordenadas reduzido, tomando como base aquelas apresentadas nos itens anteriores.

Substituindo o valor de $\frac{\partial \sigma}{\partial z}$, dado pela equação 20 na equação de equilíbrio 8, tem-se que

$$\frac{\partial \sigma^l}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z} + (\gamma_w - \gamma_s) = 0 \quad (25)$$

Explicitando $\frac{\partial u}{\partial z}$ na equação 25 e substituindo-o na lei de Darcy-Gersevanov, equação 22, obtém-se

$$v_z = -\frac{k}{\gamma_w(1+e)} \cdot \frac{\partial \sigma^l}{\partial z} - \frac{\gamma_w - \gamma_s}{\gamma_w} \cdot \frac{k}{1+e} \quad (26)$$

Derivando v_z , dado pela equação acima, em relação a z , e substituindo-o na equação da continuidade, equação 13, tem-se que

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k}{\gamma_w(1+e)} \cdot \frac{\partial \sigma^l}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \right) \cdot \frac{k}{1+e} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (27)$$

que corresponde à equação diferencial do adensamento com grandes deformações para solos heterogêneos, levando em consideração a deformação secundária e os carregamentos não-monotônicos (GIBSON et al., 1967).

Supondo-se que o solo é homogêneo, que suas propriedades não variam com o tempo e que o carregamento é monotônico, podem-se considerar a permeabilidade e a tensão efetiva como função apenas do índice de vazios, ou seja, as equações 23 e 24 reduzem-se a

$$k = F(e) \quad (28)$$

$$\sigma^l = G(e) \quad (29)$$

Dessa forma, aplicando-se a regra da cadeia dada por

$$\frac{\partial[\]}{\partial z} = \frac{\partial[\]}{\partial e} \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \quad (30)$$

à equação 27, chega-se a

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w \cdot (1+e)} \cdot \frac{d\sigma^l}{de} \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \left(1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial e} \left[\frac{k(e)}{(1+e)} \right] \cdot \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (31)$$

Esta é a equação diferencial não-linear que controla o adensamento com grandes deformações, supondo-se que o solo seja homogêneo, saturado, carregado monotonicamente e com propriedades invariantes com o tempo, que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[g(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right] + f(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (32)$$

em que

$$g(e) = \frac{k(e)}{\gamma_w \cdot (1+e)} \cdot \frac{d\sigma^l}{de} \quad (33)$$

e

$$f(e) = \left(1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial e} \left[\frac{k(e)}{(1+e)} \right] \quad (34)$$

sendo $f(e)$ correspondente ao termo de peso próprio.

Supondo-se que as forças de peso próprio não induzem adensamento, a equação 31 transforma-se em

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w \cdot (1+e)} \cdot \frac{d\sigma^l}{de} \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right] = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (35)$$

Supondo ainda que o coeficiente de compressibilidade $a_v = \frac{de}{d\sigma^|}$ e a permeabilidade k não dependem da posição z , obtém-se

$$\frac{k}{\gamma_w \cdot a_v} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\frac{1}{1+e} \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right) = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (36)$$

sendo

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{de}{d\sigma^|} \cdot \frac{\partial \sigma^|}{\partial z} \quad (37)$$

e

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{de}{d\sigma^|} \cdot \frac{\partial \sigma^|}{\partial t} \quad (38)$$

Logo, usando a transformação de coordenadas (equação 3), tem-se

$$\frac{k(1+e)}{\gamma_w \cdot a_v} \cdot \frac{\partial^2 \sigma^|}{\partial \xi^2} = \frac{\partial \sigma^|}{\partial t} \quad (39)$$

Aplicando o princípio das tensões efetivas, chega-se a

$$\frac{k \cdot (1+e)}{\gamma_w \cdot a_v} \cdot \left[\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 u_w}{\partial \xi^2} \right] = \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial u_w}{\partial t} \quad (40)$$

Supondo que as tensões totais são constantes com a posição, $\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \xi^2} = 0$ e,

além disso, com o tempo, $\frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0$, logo

$$\frac{k \cdot (1+e)}{\gamma_w \cdot a_v} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (41)$$

que é a equação proposta por TERZAGHI (1927) para o adensamento com deformações infinitesimais.

Conclui-se, portanto, que a equação 27 é geral, pois todas as demais equações das diversas teorias de adensamento unidimensional podem ser encontradas a partir dela, como casos particulares.

4. MÉTODOS DE ANÁLISE DO ENSAIO CRD UTILIZADOS NO TRABALHO

4.1. Análise de Znidarcic e de outros (1986)

Este método de análise consiste em se utilizar um processo de inversão no qual os parâmetros do material são obtidos pelo ajuste da solução analítica aos resultados obtidos experimentalmente.

A análise parte da equação 32, cujo desenvolvimento foi apresentado no Capítulo 3.

As condições de contorno para o ensaio CRD são, conforme ZNIDARCIC e SCHIFFMAN, 1981

$$\frac{\partial e}{\partial z} + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot \frac{de}{d\sigma} = \frac{v_1}{g(e)} \quad z = 0 \quad (42)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z} + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot \frac{de}{d\sigma} = \frac{v_2}{g(e)} \quad z = h_z \quad (43)$$

em que v_1 e v_2 são as velocidades impostas às bordas superior e inferior, respectivamente.

A condição inicial é dada por

$$e(z,0) = e(z) \quad (44)$$

A solução analítica é alcançada desprezando-se o termo de peso próprio da equação 32, $f(e)$ e supondo-se que a função $g(e)$ seja constante. Assim, para a primeira consideração, a equação 32, bem como as condições de contorno dadas pelas equações 42 e 43, torna-se

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[g(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right] = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (45)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{v_1}{g(e)} \quad z = 0 \quad (46)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{v_2}{g(e)} \quad z = h_z \quad (47)$$

A influência desta simplificação no resultado final é mínima, pois, como as amostras para realização do ensaio são finas, as tensões induzidas em razão do peso próprio serão pequenas e, portanto, desprezíveis.

Aplicando a segunda hipótese, $g(e)$ constante, chega-se às seguintes equações:

$$g \cdot \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad 0 \leq z \leq h_z \quad t > 0 \quad (48)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{v_1}{g} \quad z = 0 \quad (49)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{v_2}{g} \quad z = h_z \quad (50)$$

Dessa forma, a equação torna-se linear, possibilitando a obtenção de uma solução, dadas as condições de contorno e inicial.

Para fazer valer essa última consideração, sem, no entanto, causar um erro considerável na análise, o tempo total do ensaio é dividido em vários intervalos de tempo Δt que representariam vários ensaios de curta duração, para os quais $g(e)$ pode ser adotada como constante.

Dessa forma, passa-se a ter a seguinte equação simplificada para cada intervalo de tempo Δt

$$g \cdot \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad 0 \leq z \leq h_z \quad t_1 < t < t_1 + \Delta t \quad (51)$$

Esta aproximação depende da magnitude da variação do índice de vazios no interior da amostra durante cada incremento de tempo, podendo-se conseguir uma pequena variação do índice de vazios para intervalos de tempo suficientemente pequenos e velocidade de ensaio baixa.

A análise é desenvolvida em termos das variáveis adimensionais, conforme descritas a seguir

$$E = \frac{e}{e_o} \quad (52)$$

$$Z = \frac{z}{h_z} \quad (53)$$

$$T = \frac{g \cdot t}{h_z^2} \quad (54)$$

$$V_1 = \frac{v_1 \cdot h_z}{e_o \cdot g} \quad (55)$$

$$V_2 = \frac{v_2 \cdot h_z}{e_o \cdot g} \quad (56)$$

Assim, as equações do adensamento e as condições de contorno e inicial transformam-se, respectivamente em

$$\frac{\partial^2 E}{\partial Z^2} = \frac{\partial E}{\partial T} \quad 0 < Z < h_z \quad 0 < T < \Delta T \quad (57)$$

$$\frac{\partial E}{\partial Z} = V_1 \quad Z = 0 \quad (58)$$

$$\frac{\partial E}{\partial Z} = V_2 \quad Z = 1 \quad (59)$$

$$E(Z, 0) = E(Z) \quad 0 < Z < 1 \quad (60)$$

A solução da equação 57 é, segundo OZISIK (1968):

$$E(Z, T) = \int_0^1 E(Z) dZ + D_1(T) + D_2(T) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left[a(Z, T) \cdot \int_0^1 E(Z) \cos(m\pi Z) dZ \right] + b(Z, T) \quad (61)$$

em que

$$a(Z, T) = \exp(-m^2 \pi^2 T) \cos(m\pi Z) \quad (62)$$

e

$$b(Z, T) = \frac{[1 - \exp(-m^2 \pi^2 T)] [D_1 + D_2 \cos(m\pi)]}{m^2 \pi^2 T} \cdot \cos(m\pi Z) \quad (63)$$

D_1 e D_2 , respectivamente os deslocamentos no topo e na base, são dados por

$$D_1(T) = V_1 T = \frac{v_1 \cdot t}{e_o \cdot h_z} \quad (64)$$

$$D_2(T) = V_2 T = \frac{v_2 \cdot t}{e_o \cdot h_z} \quad (65)$$

Durante o ensaio CRD são medidas as tensões totais e as poro-pressões, sendo possível obter as tensões efetivas em cada face da amostra. Assim, a variação do índice de vazios ΔE no intervalo de tempo ΔT pode ser relacionada à variação da tensão efetiva por meio do coeficiente de compressibilidade a_v , para cada face da amostra, como se segue

$$\Delta E_1 = a_{v1} \cdot \Delta \sigma_1^I, \text{ para o topo} \quad (66)$$

e

$$\Delta E_2 = a_{v2} \cdot \Delta \sigma_2^I, \text{ para a base} \quad (67)$$

A razão entre as variações do índice de vazios para o topo e para a base é assim definida:

$$R(\Delta T) = \frac{E(0,0) - E(0,\Delta T)}{E(1,0) - E(1,\Delta T)} = \frac{\Delta E_1(\Delta T)}{\Delta E_2(\Delta T)} \quad (68)$$

ou, usando as equações 66 e 67

$$R(\Delta T) = \frac{a_{v1} \cdot \Delta \sigma_1^I}{a_{v2} \cdot \Delta \sigma_2^I} \quad (69)$$

Pela equação 68 observa-se que R é função de ΔT , uma vez que $E(0,0)$ e $E(1,0)$ são dados pela condição inicial e $E(0,\Delta T)$ e $E(1,\Delta T)$ podem ser escritos em função de ΔT por intermédio da equação 61, substituindo T por ΔT e fazendo $Z = 0$ e $Z = 1$, respectivamente.

Poder-se-ia saber o valor de R dado pela equação 69 se fossem conhecidos os coeficientes de compressibilidade a_{v1} e a_{v2} , uma vez que $\Delta\sigma_1^I$ e $\Delta\sigma_2^I$ são lidos durante o ensaio. Entretanto, a compressibilidade não é conhecida. Na realidade, pretende-se conhecê-la por meio desta análise. Para contornar este problema faz-se um processo iterativo, no qual admite-se, inicialmente, que o solo comporta-se linearmente, isto é, que a_v seja constante. Dessa maneira, tem-se que $\frac{a_{v1}}{a_{v2}} = 1$ e a razão R se torna

$$R(\Delta T) = \frac{\Delta\sigma_1^I}{\Delta\sigma_2^I} \quad (70)$$

Conhecendo esta razão para cada incremento de tempo durante o ensaio, já que as variações de tensão efetiva no topo e na base são conhecidas, calcula-se o valor de ΔT correspondente por meio da equação 68 e, conseqüentemente, podem-se obter os valores do índice de vazios nas duas faces da amostra pela equação 61.

Nota-se que, empregando a equação 61 na 68, não se consegue explicitar ΔT em função de R . Faz-se, então, necessário calcular ΔT por um procedimento numérico.

Prossegue-se para o próximo intervalo de tempo ΔT , observando que os valores de índices de vazios iniciais deste novo intervalo ($E(0,0)$ e $E(1,0)$), a serem utilizados na equação 68, são os mesmos calculados no tempo ΔT , final do intervalo anterior.

No final de todos os intervalos ΔT , ou seja, no final do ensaio, obtêm-se duas relações entre índice de vazios e tensão efetiva: uma para o topo e a outra para a base da amostra. Estas relações deveriam ser únicas, mas, normalmente,

não o são, pelo fato de se ter considerado comportamento linear para a compressibilidade do material.

Obtém-se, então, uma curva média entre topo e base, a partir da qual inicia-se uma nova iteração, calculando-se novos valores de R (equação 69) desta vez com a_{v1} e a_{v2} diferentes, para cada intervalo de tempo ΔT .

Novas curvas de compressibilidade para o topo e para a base são calculadas, uma nova média é obtida e o processo iterativo continua até que as curvas do topo e da base estejam suficientemente próximas, dentro de uma tolerância preestabelecida.

Após a convergência deste processo iterativo, volta-se a fazer uma última iteração para o cálculo da permeabilidade. Nela, a cada intervalo Δt , após a obtenção de ΔT , calcula-se g pela seguinte equação:

$$g = \frac{\Delta T \cdot h_z^2}{\Delta t} \quad (54)$$

Em seguida, são calculados o índice de vazios médio da amostra no final do intervalo, o coeficiente de compressibilidade e a permeabilidade dada pela definição de g por

$$k(e) = g \cdot a_v \cdot \gamma_w \cdot (1 + e) \quad (71)$$

No final de todos os intervalos ΔT do ensaio tem-se a curva completa, que relaciona a permeabilidade com o índice de vazios.

BARBOSA (1996) desenvolveu um programa para a automatização deste procedimento, escrito para microcomputadores em linguagem C⁺⁺. Na solução da equação 68, dado um valor de R a partir dos resultados experimentais (equações 69 ou 70), o cálculo do intervalo de tempo adimensional ΔT é feito pelo programa, por meio do método da bisseção (PENNINGTON, 1965).

Pela teoria, o valor de R varia entre um número muito grande e a unidade, em virtude de a variação da tensão efetiva na base ser praticamente nula

(velocidade muito alta) ou igual à variação da tensão efetiva no topo (velocidade muito baixa). Entretanto, oscilações nas curvas de laboratório, conforme mostrado na Figura 7, e freqüentes em qualquer experimento, podem originar valores de R fora deste intervalo, para os quais não se consegue obter valor de ΔT .

Não tendo sido possível solucionar este problema, optou-se por um outro tipo de análise, que será apresentada a seguir.

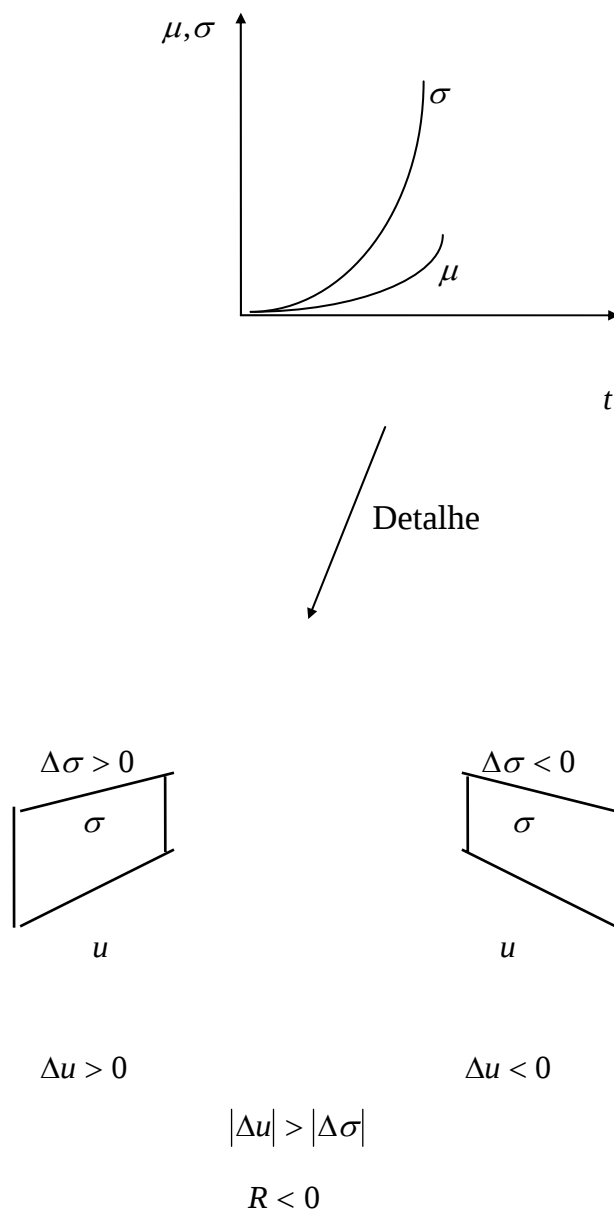


Figura 7 - Detalhe das oscilações nas curvas de laboratório.

4.2. Análise simplificada

De acordo com esta análise, em parte baseada no procedimento proposto por MARTINEZ et al. (1987), supõe-se que a poro-pressão se distribua ao longo da altura da amostra, Figura 8, conforme a seguinte equação do segundo grau:

$$u(x) = a + bx + cx^2 \quad (72)$$

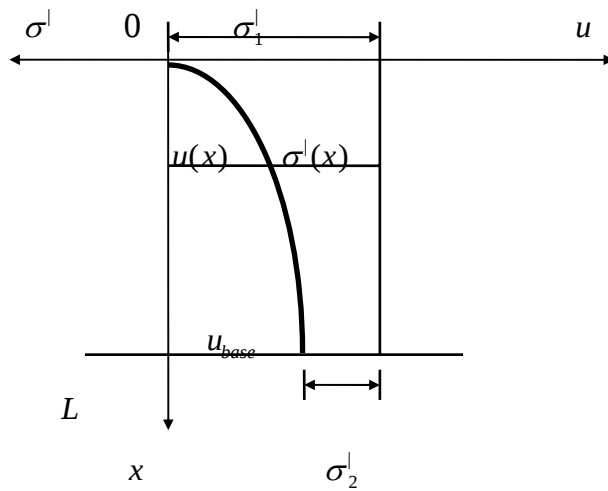


Figura 8 - Distribuição simplificada da poro-pressão e da tensão efetiva com a profundidade.

em que a , b e c podem ser obtidos por meio das seguintes condições de contorno do ensaio:

$$u(x) = 0 \text{ para } x = 0 \quad \therefore \quad a = 0 \quad (73)$$

$$u(x) = \mu_{base} \text{ para } x = L \quad \therefore \quad u_{base} = b.L + c.L^2 \quad (74)$$

e

$$\frac{du}{dx}(x) = 0 \text{ para } x = L \quad \therefore \quad 0 = b + 2.c.L \quad (75)$$

Reunindo-se as equações 74 e 75, têm-se que

$$c = -\frac{u_{base}}{L^2} \quad (76)$$

e

$$b = \frac{2u_{base}}{L} \quad (77)$$

Conseqüentemente, a distribuição da poro-pressão com a profundidade, equação 72, será:

$$u(x) = \frac{2u_{base}}{L} \cdot x - \frac{u_{base}}{L^2} \cdot x^2 \quad (78)$$

Como $u_{base} = \sigma_1^l - \sigma_2^l$, então

$$\sigma^l(x) = \sigma_1^l - \frac{2}{L}(\sigma_1^l - \sigma_2^l) \cdot x + \frac{\sigma_1^l - \sigma_2^l}{L^2} \cdot x^2 \quad (79)$$

4.2.1. Cálculo do $\sigma^l_{médio}$

$$\sigma^l_{médio} = \int_0^L \frac{\sigma^l(x) \cdot dx}{L} \quad \therefore \quad \sigma^l_{médio} = \sigma_2^l + \frac{\sigma_1^l - \sigma_2^l}{3} \quad (80)$$

Do ensaio, $\sigma_1^l = \sigma_{base}$ e $\sigma_2^l = \sigma_{base} - u_{base}$, logo

$$\sigma^l_{médio} = \sigma_{base} - \frac{2}{3}u_{base} \quad (81)$$

4.2.2. Cálculo do $e_{\text{médio}}$

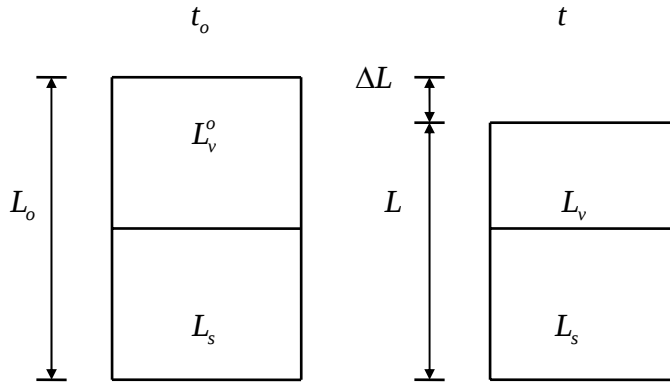


Figura 9 - Variação do índice de vazios.

$$\Delta e = e_o - e = \frac{L_v^o - L_v}{L_s} = \frac{\Delta L}{L_s} \quad (82)$$

Se

$$L_o = L_v^o + L_s = L_s \cdot (1 + e_o) \quad \therefore \quad L_s = \frac{L_o}{1 + e_o} \quad (83)$$

então

$$\Delta e = \frac{\Delta L}{L_o} \cdot (1 + e_o) \quad (84)$$

e

$$e = e_o - \frac{L_o - L}{L_o} \cdot (1 + e_o) \quad (85)$$

Simplificando, tem-se que

$$e = e_{\text{médio}} = \left(\frac{1 + e_o}{L_o} \right) \cdot L - 1 \quad (86)$$

4.2.3. Cálculo do $k_{\text{médio}}$

O coeficiente de permeabilidade, k , é obtido pela lei de Darcy-Gersevanov, equação 21:

$$n.(v_w - v_s) = -k.i \quad (21)$$

em que i é o gradiente hidráulico.

A integração da condição de continuidade para as duas fases do sistema, equação 11, considerando n constante, leva à relação

$$(1-n).v_s + (n).v_w = 0 \quad (87)$$

Combinando as equações 21 e 88 para eliminar a velocidade da água, tem-se que

$$v_s = k.i \quad \therefore \quad k = \frac{v_s}{i} \quad (88)$$

sendo o gradiente hidráulico, i , igual a:

$$i = \frac{1}{\gamma_w} \cdot \frac{du}{dx} \quad (89)$$

Para se obter o coeficiente de permeabilidade médio, $k_{\text{médio}}$, a partir da equação 89, supõe-se um gradiente médio, ou seja:

$$i_{\text{médio}} = \frac{1}{\gamma_w} \cdot \left(\frac{du}{dx} \right)_{x=\frac{L}{2}} = \frac{1}{\gamma_w} \cdot \frac{u_{\text{base}}}{L} \quad (90)$$

e uma velocidade de sólidos média. A velocidade do pistão é equivalente à dos sólidos no topo da amostra, sendo zero a velocidade dos sólidos na base. Dessa forma, a velocidade média dos sólidos é

$$v_{\text{media}} = \frac{v}{2} \quad (91)$$

em que v é a velocidade do ensaio ou do pistão.

Finalmente, substituindo na equação 88 os valores médios encontrados nas equações 90 e 91, conclui-se que

$$k_{\text{médio}} = \frac{\frac{v}{2}}{\frac{u_{\text{base}}}{L} \cdot \frac{1}{\gamma_w}} \quad \therefore \quad k_{\text{médio}} = \frac{v \cdot L \cdot \gamma_w}{2u_{\text{base}}} \quad (92)$$

Com o propósito de verificar a validade desta análise, fez-se um estudo, de acordo com ZNIDARCIC et al. (1986), à partir de um programa que calcula o adensamento unidimensional, segundo a teoria de grandes deformações apresentada no capítulo anterior, simulou-se um ensaio tipo CRD, fornecendo-se ao programa a altura inicial da amostra, o índice de vazios inicial, a velocidade, a compressibilidade (curva e x σ^v) e a permeabilidade (curva e x k). Como resultado, obtiveram-se do programa, dentre outras coisas, as variações com o tempo da tensão total no topo da amostra e da poro-pressão na base da amostra. Estas variações, dados de entrada de qualquer análise, são exatamente o que se obtém no ensaio CRD. Portanto, pode-se verificar a validade de uma análise tomando-se as curvas de σ x t e u x t fornecidas pelo programa e verificando-se se as relações de compressibilidade e permeabilidade obtidas pela análise estão próximas das fornecidas ao programa.

A Figura 10 mostra as curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ fornecidas pelo programa, e as Figuras 11 e 12, as comparações entre as curvas de compressibilidade e permeabilidade obtidas pela análise simplificada e fornecidas ao programa de adensamento com grandes deformações.

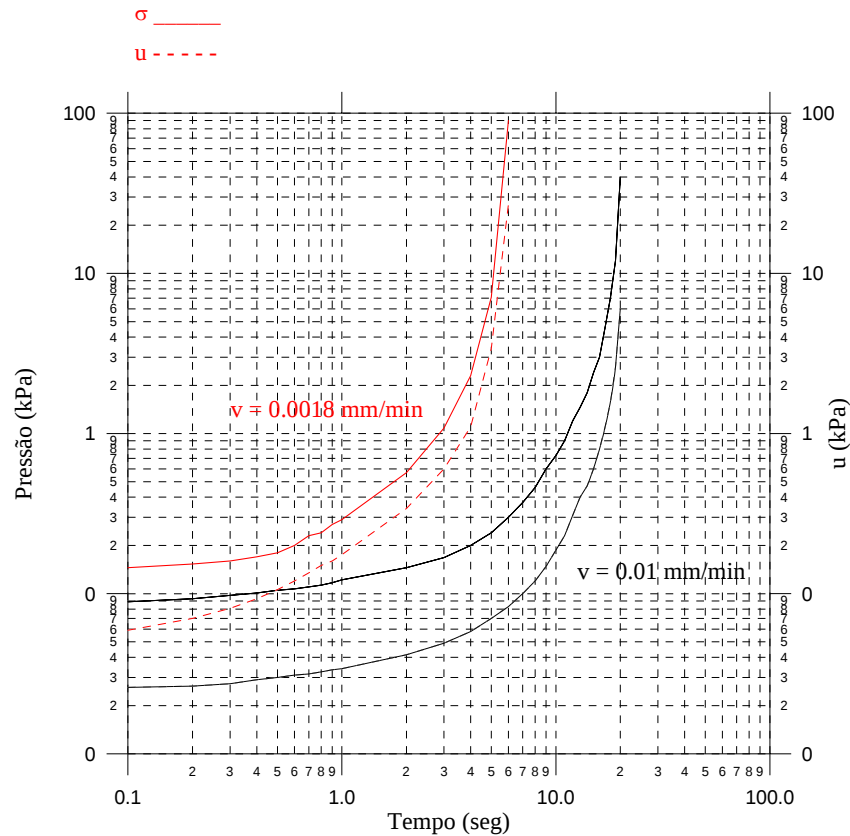


Figura 10 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Argila fosfática da Flórida.

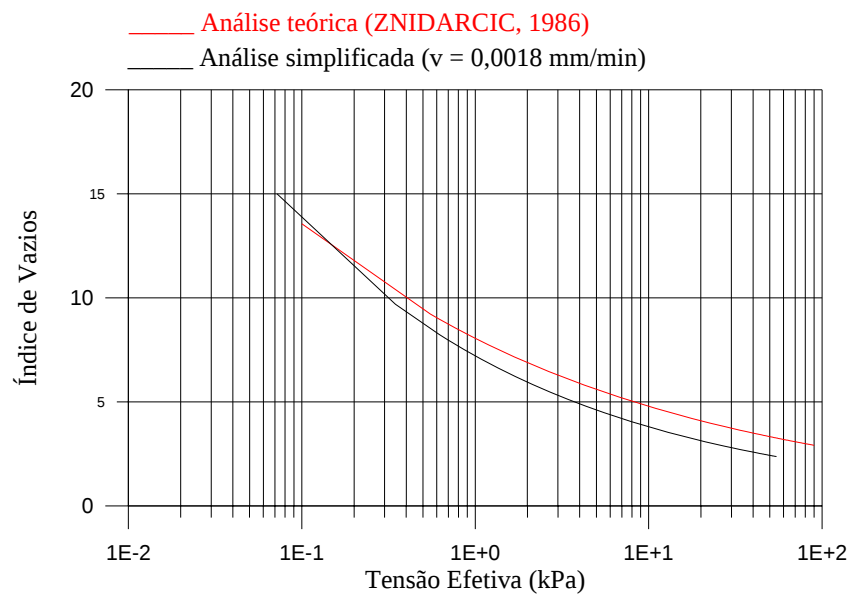


Figura 11 - Curvas $e \times \sigma'$ - Análise simplificada e teórica (ZNIDARCIC, 1986).

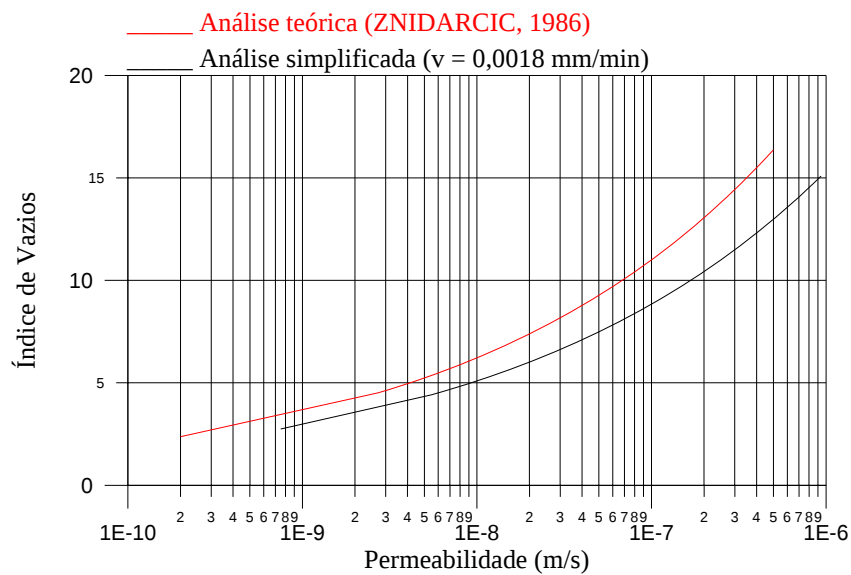


Figura 12 - Curvas $e \times k$ - Análise simplificada e teórica (ZNIDARCIC, 1986).

Como pode ser observado, as curvas de compressibilidade ($e \times \sigma^v$) e permeabilidade ($e \times k$) não se mostraram muito diferentes. Por este motivo e levando-se em consideração as dificuldades encontradas no uso da análise de ZNIDARCIC et al. (1986), adotou-se a análise simplificada no cálculo dos ensaios realizados.

5. DESCRIÇÃO DO OEDÔMETRO TIPO CRD DESENVOLVIDO

A realização de um ensaio de adensamento com taxa de deslocamento constante em materiais com consistência inicial de lama requer um equipamento especial, com sistema de vedação adequado, para evitar o vazamento de sólidos, e suficientemente grande para acomodar uma amostra representativa do material.

5.1. Descrição do oedômetro tipo CRD

A Figura 13 apresenta um corte esquemático do equipamento desenvolvido para realização do ensaio de adensamento com taxa de deslocamento constante.

O oedômetro, que pode ser dividido basicamente em quatro partes, conforme descrito a seguir, foi todo projetado em PVC rígido, para evitar possível corrosão do equipamento por amostras não neutralizadas.

5.1.1. Base da célula oedométrica

A base do oedômetro, onde se encaixa o anel inferior, possui uma pedra porosa no centro e amplos canais, através dos quais a água flui, possibilitando a medição da poro-pressão desenvolvida ao longo do ensaio, na base do corpo de prova.

A Figura 14 mostra um corte da base do oedômetro com as respectivas dimensões.

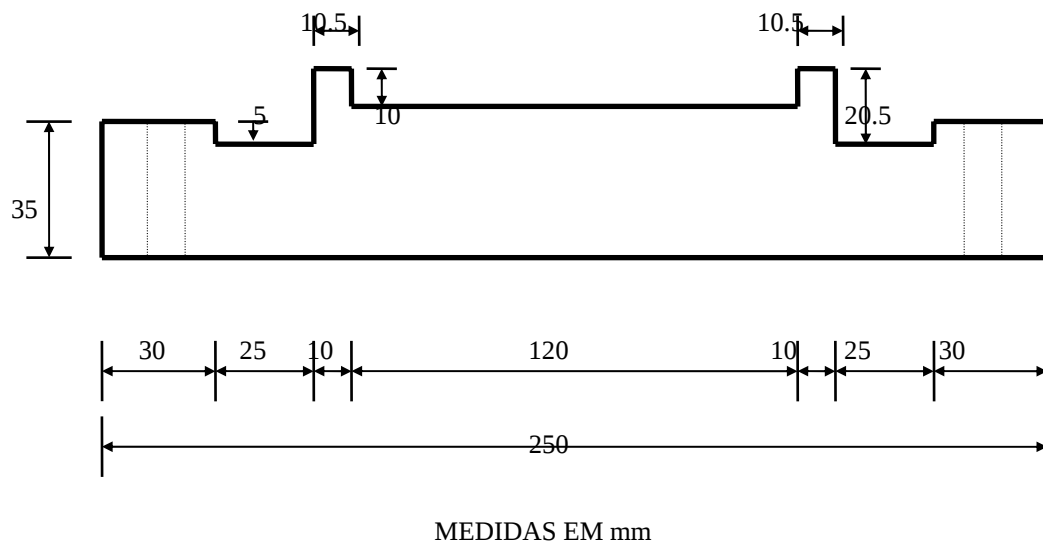


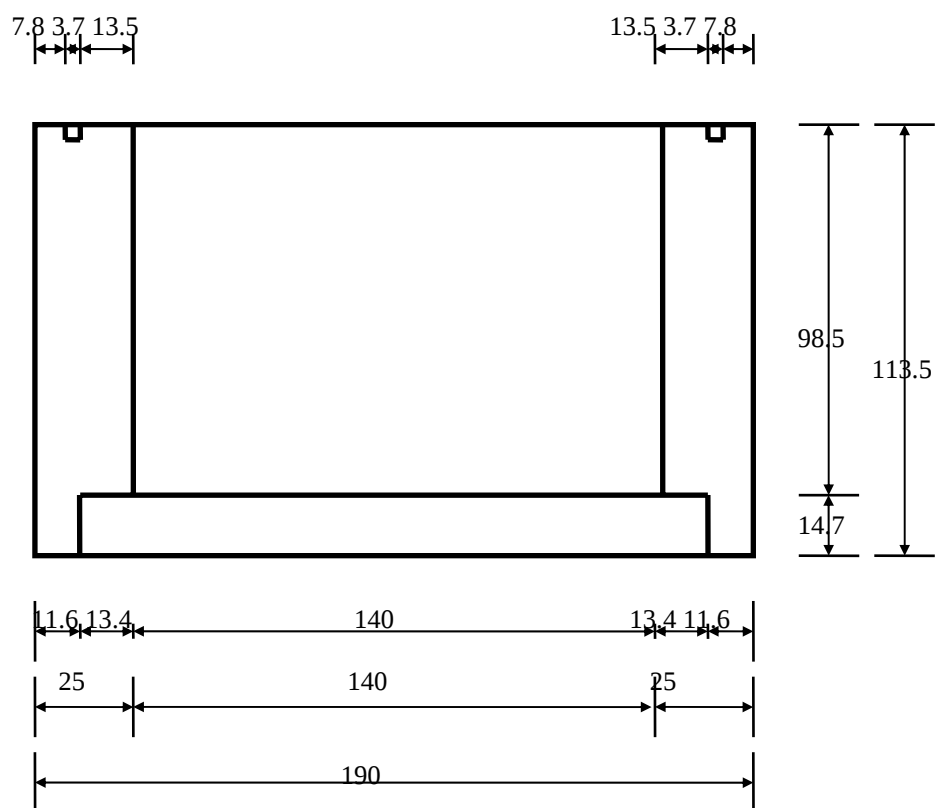
Figura 14 - Base do oedômetro.

5.1.2. Câmara oedométrica

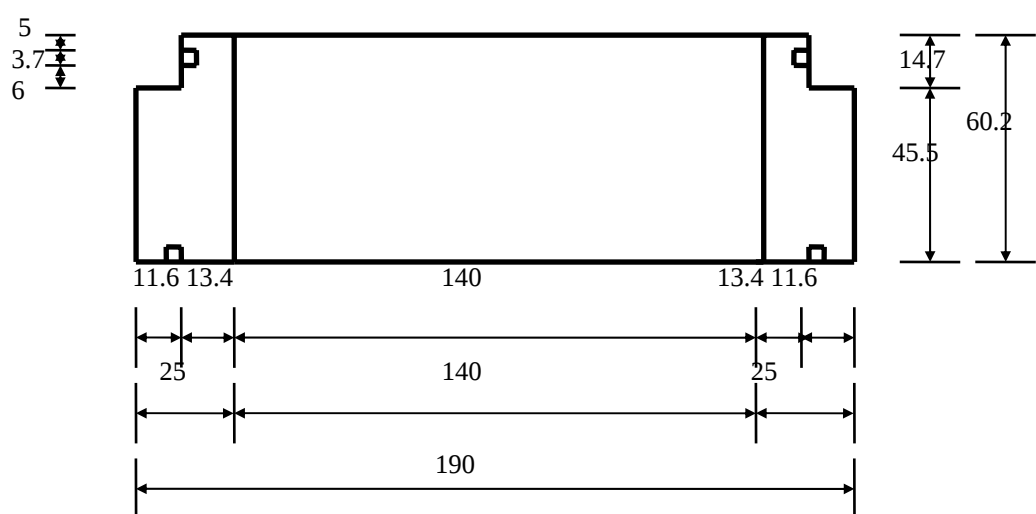
A câmara oedométrica é composta por dois anéis: o anel inferior, no qual a amostra é depositada para realização do ensaio, e o anel superior, que serve de guia para o pistão.

Um esquema dos anéis com respectivos o-rings para vedação pode ser observado na Figura 15.

ANEL SUPERIOR

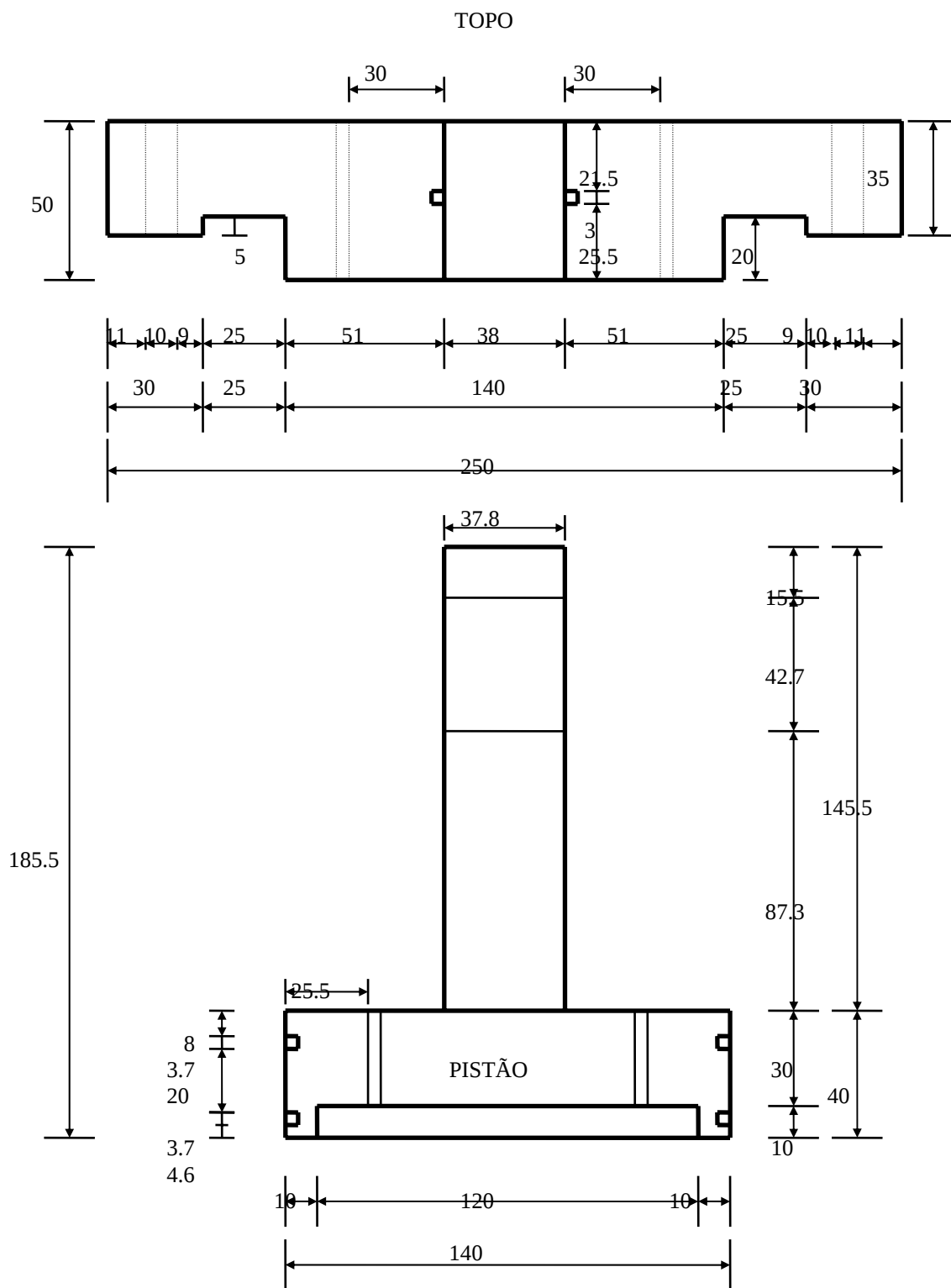


ANEL INFERIOR



MEDIDAS EM mm

Figura 15 - Anéis superior e inferior da câmara oedométrica.



MEDIDAS EM mm

Figura 16 - Topo do oedômetro e pistão.

5.1.3. Topo do oedômetro

O topo do oedômetro apresenta um furo central para possibilitar a passagem da haste do pistão e a sua movimentação durante o ensaio. Possui também dois orifícios: um para a aplicação da contrapressão e o outro para permitir a saída do ar durante a saturação do sistema. Maiores detalhes do topo são mostrados na Figura 16.

5.1.4. Pistão

O pistão apresentado na Figura 16, com a função de pressionar a amostra durante o ensaio, apresenta uma pedra-porosa encaixada à sua base, permitindo a drenagem da água.

5.2. Prensa de ensaio e viga de reação

Para completar o sistema, utilizam-se uma prensa de ensaio e viga de reação. O topo permanece fixo enquanto a base movimenta-se a uma velocidade constante, imposta pela prensa.

Este conjunto pode ser visualizado na Figura 18.

5.3. Instrumentação

A instrumentação necessária para realização do ensaio consta de um medidor de tensão total, um medidor de poro-pressão e um medidor de deslocamento. O equipamento foi projetado para que a leitura da tensão total fosse feita no centro da base da amostra por um transdutor elétrico de pressão. Entretanto, em face da inexistência deste instrumento no Laboratório de Geotecnia da UFV e do seu elevado custo, optou-se por medir a tensão total por intermédio de um anel dinamométrico, no qual se acoplava o pistão. Este procedimento é desvantajoso, porque mede uma tensão total maior que a

efetivamente aplicada ao corpo-de-prova, em virtude do inevitável atrito que ocorre entre este e as paredes laterais do oedômetro. Entretanto, no equipamento desenvolvido este atrito é baixo, pois o pistão desce sozinho, somente em razão do seu peso próprio.

A poro-pressão na base não-drenada foi medida por meio de um transdutor de pressão tipo HM-200 da sodmex (escala nominal 1000 kPa) e a deformação da amostra, por um extensômetro.

5.4. Procedimento de ensaio

A amostra era preparada, acrescentando-se água destilada ao solo e misturando o conjunto até se obter uma lama com o teor de umidade inicial desejado.

Para a realização dos ensaios eram seguidas as seguintes etapas:

- Conectava-se o transdutor de poro-pressão à base do oedômetro sobre o prato da prensa.
- A saturação da pedra-porosa da base era feita deixando-se percolar água através do canal que serve para medição de poro-pressão até que a água cobrisse toda a pedra porosa.
- Colocava-se o papel-filtro sobre a pedra-porosa para evitar a colmatação da mesma pelo solo e encaixava-se o anel inferior na base, onde era depositada a amostra.
- Após o topo da amostra ter sido rasado, o anel superior era encaixado no inferior e fazia-se a montagem do topo do oedômetro com o pistão que era ajustado ao anel dinamométrico fixo à viga de reação.
- A câmara era então fechada com as barras de latão, apertadas com porcas, de maneira a tornar estanque e evitar vazamentos durante o ensaio.
- O extensômetro era colocado sobre o topo do equipamento para medir as deformações do corpo-de-prova e o pistão era encostado na amostra.
- Para os ensaios realizados com aplicação de contra-pressão, a câmara era preenchida com água desaerada, introduzida através da linha de drenagem

ligada ao furo no topo do equipamento, enquanto o ar era expulso pelo outro furo do topo ligado a uma torneira. Após expulso todo o ar, a torneira era fechada. Aplicava-se contrapressão pela linha, onde se introduzia a água e lia-se esta contrapressão na base. Neste trabalho, era aplicada uma contrapressão de 250 kPa, deixada por mais de 24 horas antes de se iniciar o ensaio e durante o mesmo.

- Preparado o sistema, eram feitas as leituras iniciais do extensômetro, anel dinamométrico e transdutor.
- Iniciado o ensaio, o prato da prensa deslocava-se para cima a uma velocidade preestabelecida e imposta pelo conjunto de engrenagens. O pistão passava a comprimir a amostra, a água drenava pelos furos existentes no pistão ficando sobre o mesmo, enquanto a amostra adensava.
- Foram tomadas as leituras do anel dinamométrico e do transdutor de poro-pressão que forneceram, respectivamente, a tensão total aplicada à amostra e a poro-pressão gerada na base, em intervalos preestabelecidos pela variação da deformação, obtida por meio do extensômetro.

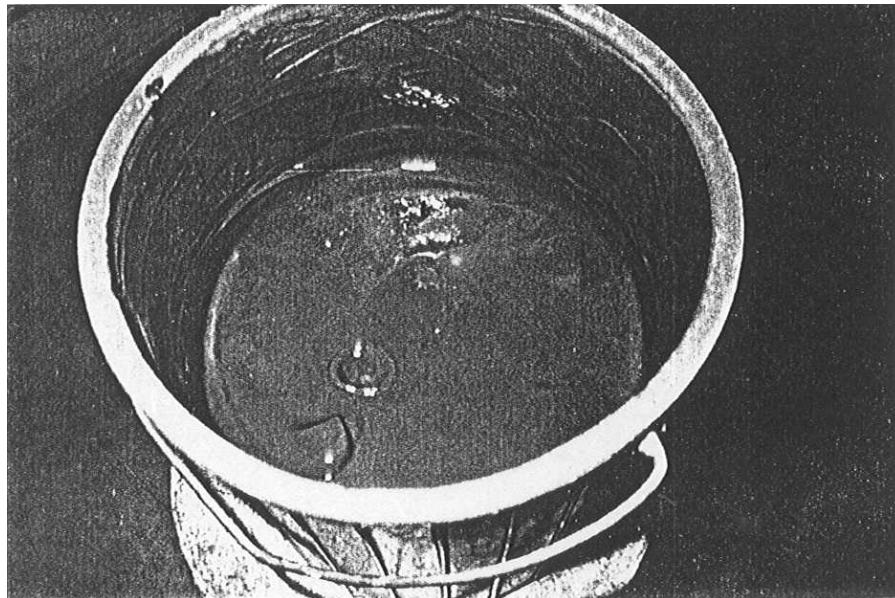


Figura 17 - Amostra do rejeito da mina da Mutuca a ser ensaiada.

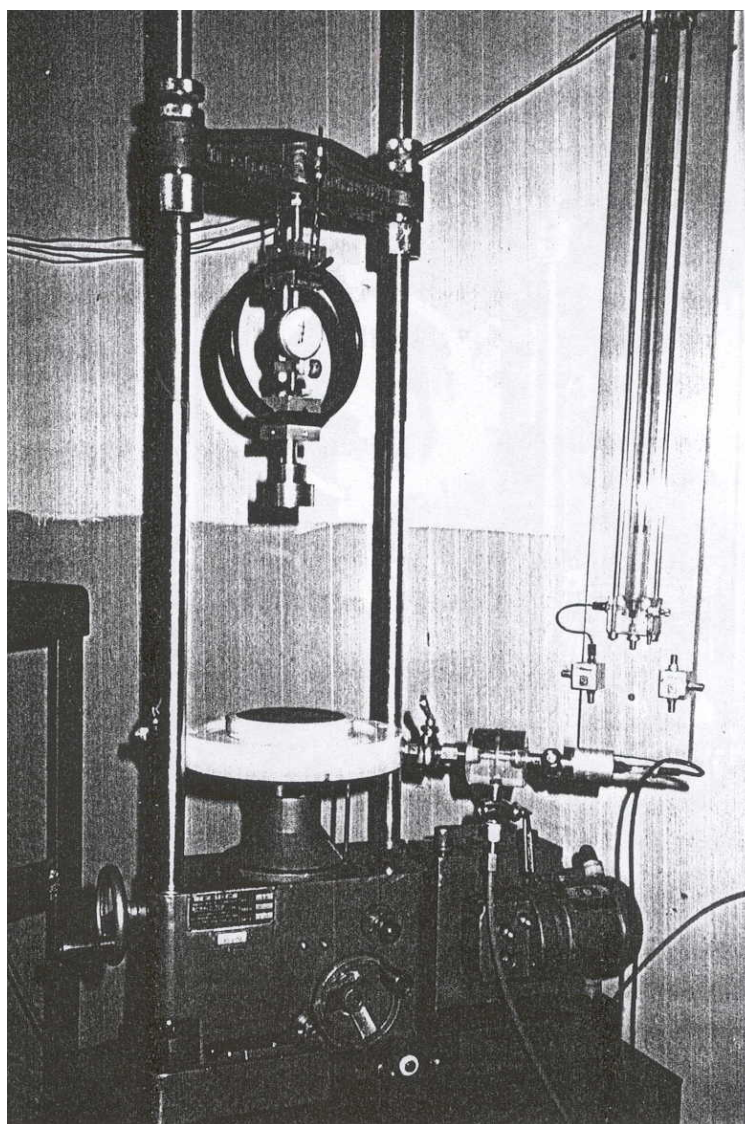


Figura 18 - Montagem da base na prensa.

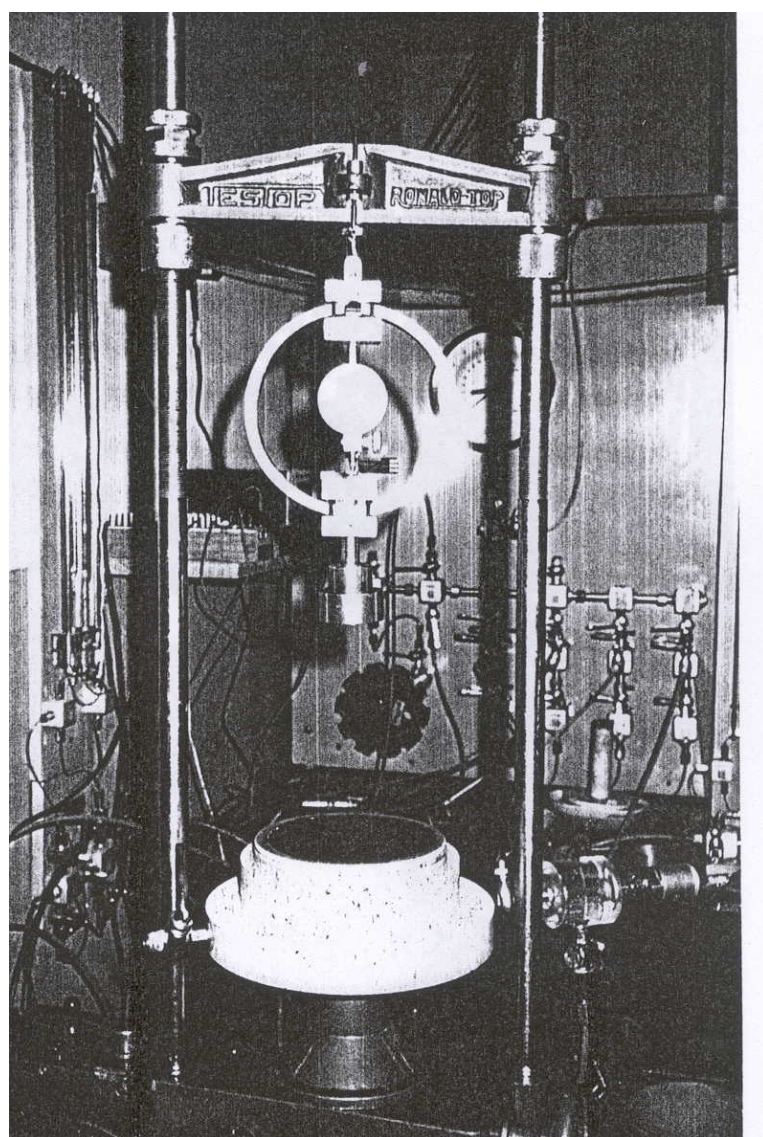


Figura 19 - Colocação do anel inferior e assentamento da amostra.

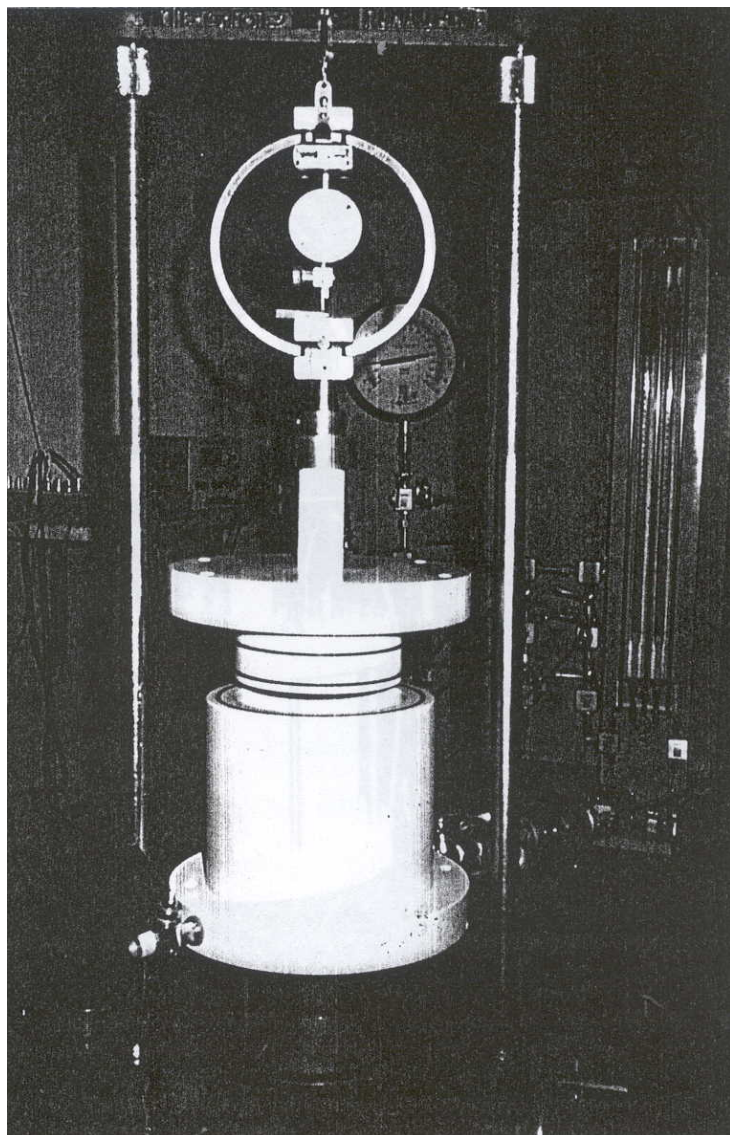


Figura 20 - Colocação do anel superior e montagem do topo com o pistão.

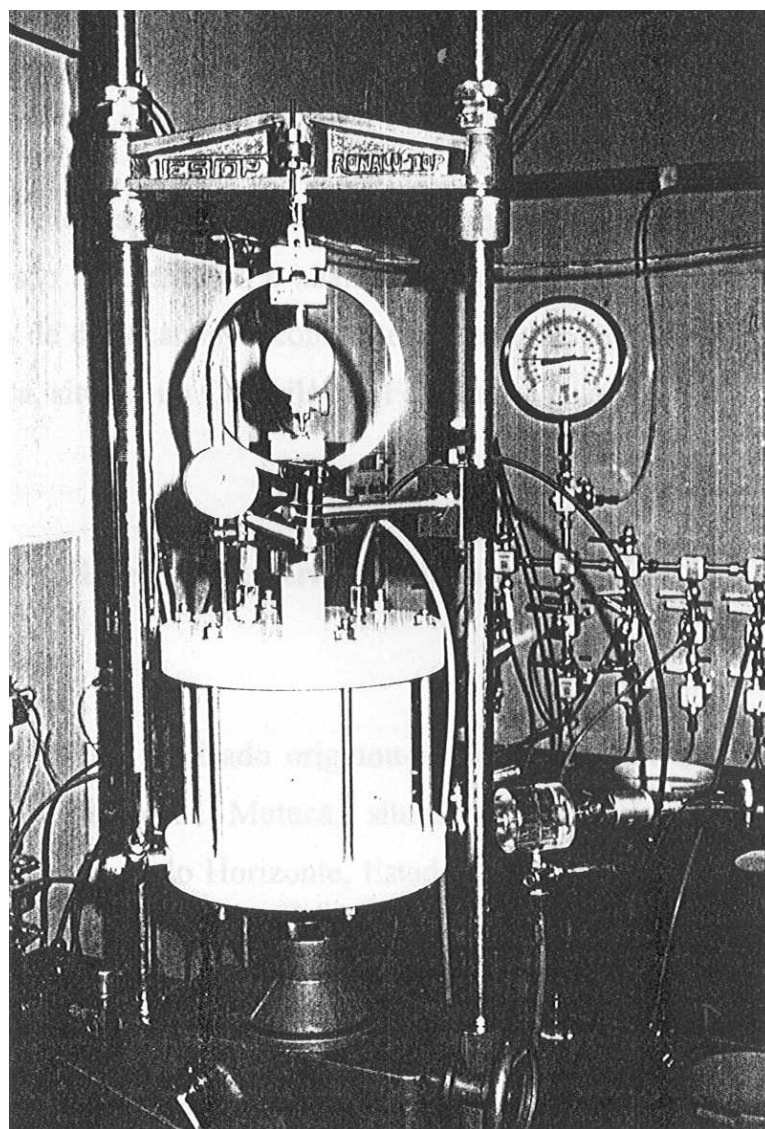


Figura 21 - Sistema preparado para realização do ensaio.

6. DESCRIÇÃO DO MATERIAL, APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Neste capítulo, primeiramente descreve-se o material ensaiado. Em seguida, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios oedométricos com taxa de deslocamento constante executados em amostra de rejeito da mina da Mutuca, situada no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.

6.1. Características do material ensaiado

O rejeito analisado originou-se do beneficiamento do minério de ferro extraído da mina da Mutuca, situada no município de Nova Lima, nas proximidades de Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais, sendo explorada pela empresa MBR - Minerações Brasileiras Reunidas. Este rejeito é constituído de hematita, e a amostra coletada encontra-se sob a forma de polpa ou lama (GUMIERI, 1995).

6.1.1. Ensaios de Caracterização

Os ensaios de caracterização realizados neste trabalho seguiram a metodologia proposta pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os resultados obtidos estão relacionados no Quadro 1.

Quadro 1 - Resumo das características geotécnicas da amostra de rejeito da mina da Mutuca

		Parâmetros				Parâmetros				
		Granulometria			Curva Granulométrica			Plasticidade		
Amostra	γ_s	Areia	Silte	Argila	D ₁₀	D ₆₀	C _u	LL	LP	IP
Ensaída	(kN/m ³)	(%)	(%)	(%)	(mm)	(mm)		(%)	(%)	(%)
Rejeito										
Mina da Mutuca	37,4	17,6	60,1	22,3	0,0011	0,017	15,5	36,2	16,6	19,6

Observa-se, no Quadro 1, que o valor do peso específico dos sólidos (γ_s) é elevado, certamente em razão da alta porcentagem de ferro ainda presente nos rejeitos.

A composição granulométrica do rejeito da mina da Mutuca, apresentada no Quadro 1, foi obtida da curva granulométrica mostrada na Figura 22 e

corresponde à escala granulométrica da ABNT. A partir desta composição e dos parâmetros obtidos da curva granulométrica, resumidos no Quadro 1, o rejeito pode ser classificado como silte-argilo-arenoso, bem graduado ou, como CL, segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos.

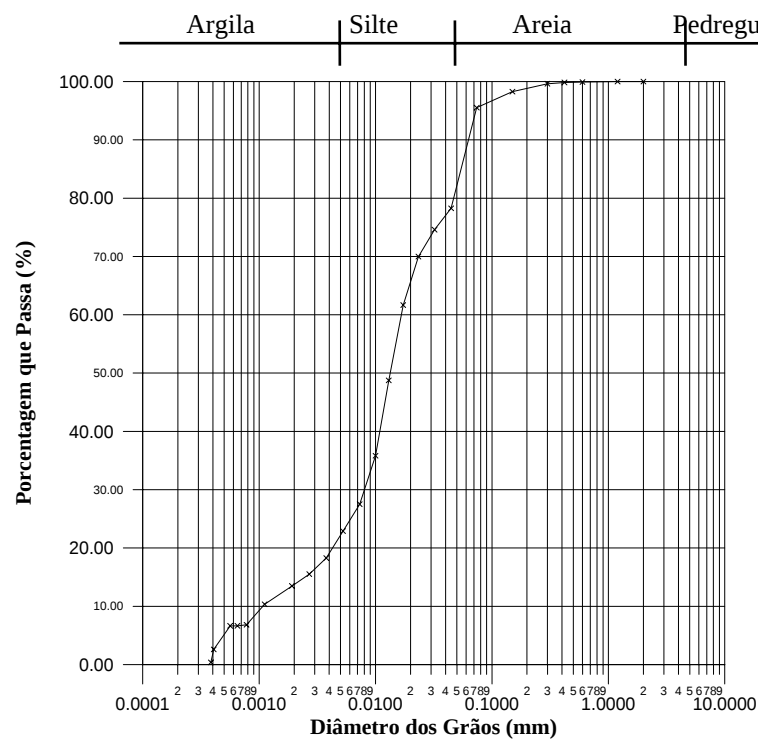


Figura 22 - Curva granulométrica do rejeito da mina da Mutuca.

6.2. Ensaio de adensamento tipo CRD realizados

Foram realizados quatorze ensaios de adensamento com taxa de deslocamento constante em amostras de rejeito da mina da Mutuca. Posteriormente, os resultados obtidos foram analisados e comparados para se chegar a uma conclusão a respeito da eficiência do equipamento desenvolvido, bem como sobre a influência de parâmetros como a velocidade de deformação, o teor de umidade, as alturas iniciais da amostra e a aplicação ou não de contrapressão, no comportamento da amostra testada.

Destacam-se a seguir alguns dados dos ensaios oedométricos com taxa de deslocamento constante realizados para o presente trabalho, necessários para a análise da influência dos parâmetros ora citados.

A contrapressão foi utilizada somente a partir do oitavo ensaio CRD. Os ensaios de número oito a onze foram executados em amostras com 80 mm de altura inicial enquanto os demais com altura inicial de 40 mm. O Quadro 2 apresenta um resumo dos ensaios oedométricos tipo CRD realizados, fornecendo, além dos dados já mencionados, a velocidade de ensaio, os teores de umidade no início e fim do ensaio, os respectivos índices de vazios, a variação total na altura da amostra, a tensão total final atingida e o máximo valor da poro-pressão alcançado.

Foram adotadas basicamente três velocidades para realização dos ensaios tipo CRD, sendo a mais lenta de 0,0756 mm/min, a média de 0,150 mm/min e a mais rápida de 0,301 mm/min. A velocidade de 0,751 mm/min, ou seja, muito rápida, foi utilizada apenas no ensaio nº 7.

Em seguida serão apresentadas as curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$, $e \times \sigma^l$, $e/e_o \times \sigma^l$, $e \times k$, $e/e_o \times k$ e u/σ_{base} para várias situações de ensaio, possibilitando-se analisar a influência dos fatores mencionados anteriormente.

Quadro 2 - Resumo dos ensaios oedométricos tipo CRD realizados

Ensaio Oedométrico com Taxa de Deslocamento Constante										
Ensaio	h_0 (mm)	Contra Pressão	Velocidade (mm/min)	$w_{inicial}$ (%)	w_{final} (%)	$e_{inicial}$	e_{final}	Δh (mm)	σ_{final} (kPa)	μ_{max} (kPa)
1	40	não	0,0756	54,69	31,06	2,045	1,162	11,6	608	2,9
2	40	não	0,150	53,84	30,49	2,013	1,140	11,6	626	10,5
3	40	não	0,301	54,33	31,03	2,032	1,160	11,5	605	34,4
4	40	não	0,0756	82,88	32,78	3,100	1,226	18,3	518	8,4
5	40	não	0,150	82,04	33,26	3,068	1,244	17,9	516	18,6
6	40	não	0,301	81,83	33,27	3,061	1,244	17,9	502	39,2
7	40	não	0,751	81,79	34,07	3,059	1,274	17,6	568	121,1
8	80	sim	0,0756	97,89	32,76	3,661	1,225	41,8	603	22,4
9	80	sim	0,0756	75,91	32,44	2,839	1,213	33,9	473	23
10	80	sim	0,150	75,18	31,46	2,811	1,176	34,3	616	48,2
11	80	sim	0,301	75,48	32,22	2,823	1,205	33,9	598	114,4
12	40	sim	0,0756	83,92	32,76	3,139	1,225	18,5	631	8,4
13	40	sim	0,150	89,81	32,67	3,359	1,222	19,6	611	15,9
14	40	sim	0,301	86,6	32,61	3,239	1,220	19,1	628	37,5

6.2.1. Análise da influência da velocidade

Nas figuras que se seguem são apresentados os resultados de ensaios que possuem alturas iniciais, teores de umidade inicial e condição de aplicação de contrapressão iguais, diferenciando-se apenas quanto à velocidade de deformação adotada.

Os ensaios 1, 2 e 3, cujos resultados são mostrados nas Figuras 23, 24 e 25, com altura inicial de 40 mm, teor de umidade inicial próximo de 54%, foram realizados sem aplicação de contrapressão e com velocidades de 0,0756mm/min, 0,150mm/min e 0,301mm/min, respectivamente.

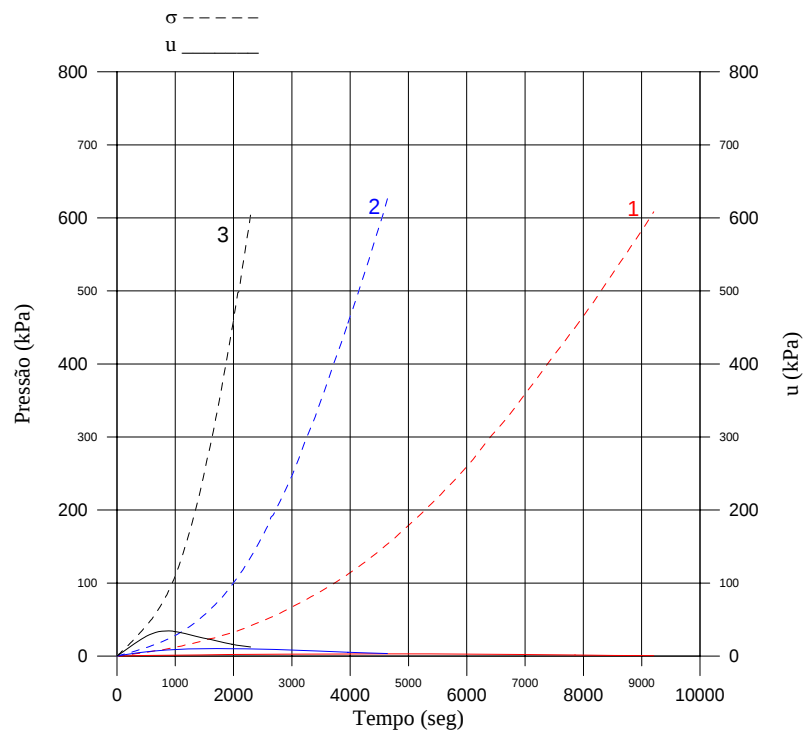


Figura 23 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 1, 2 e 3: velocidades diferentes.

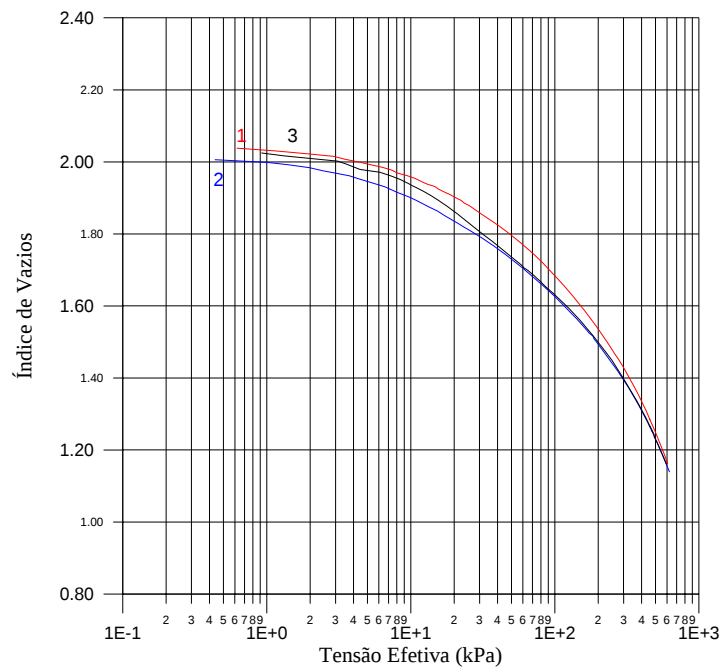


Figura 24 - Curva $e \times \sigma'_v$ - Ensaios 1, 2 e 3: velocidades diferentes.

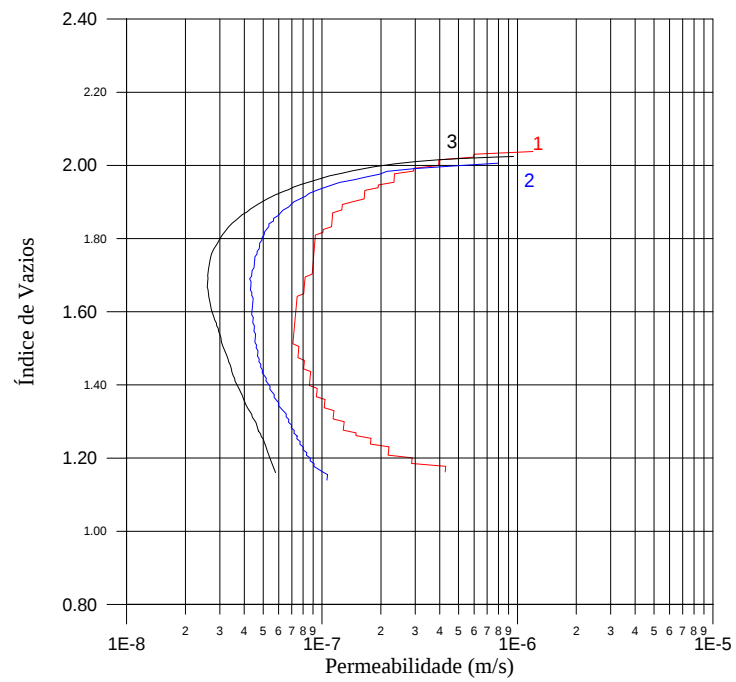


Figura 25 - Curva $e \times k$ - Ensaios 1, 2 e 3: velocidades diferentes.

Os ensaios 4, 5, 6 e 7, cujos resultados são mostrados nas Figuras 26, 27 e 28, com altura inicial de 40 mm, teor de umidade inicial próximo de 82%, foram realizados sem aplicação de contrapressão e com velocidades de 0,0756mm/min, 0,150mm/min, 0,301mm/min e 0,751mm/min, respectivamente.

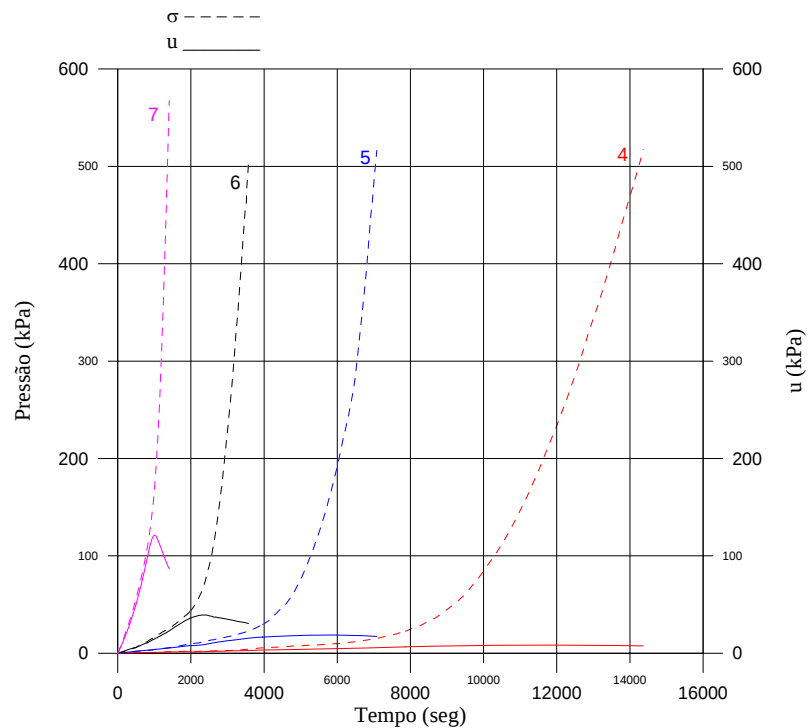


Figura 26 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 4, 5, 6 e 7: velocidades diferentes.

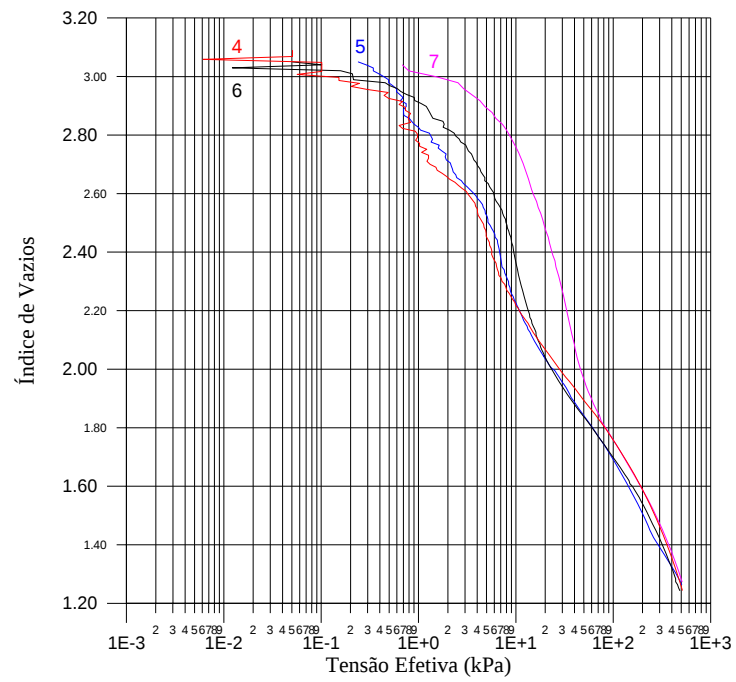


Figura 27 - Curva $e \times \sigma'$ - Ensaios 4, 5, 6 e 7: velocidades diferentes.

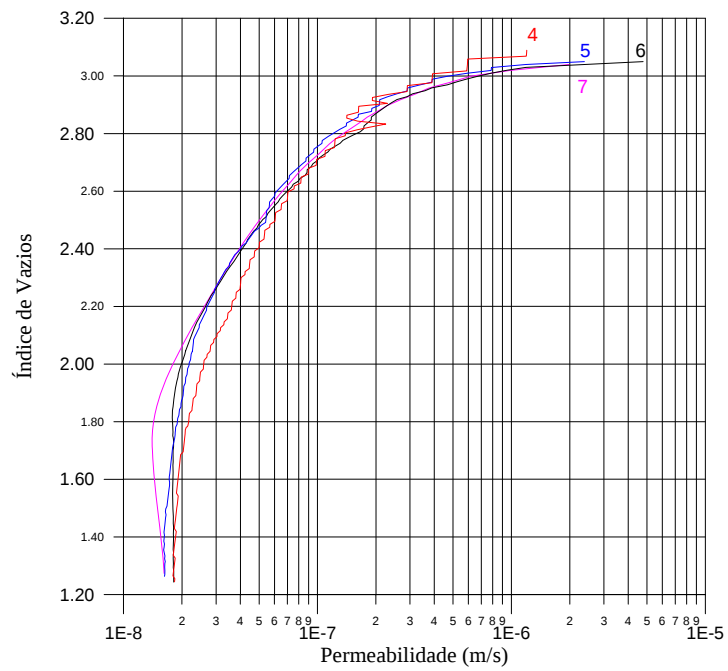


Figura 28 - Curva $e \times k$ - Ensaios 4, 5, 6 e 7: velocidades diferentes.

Os ensaios 9, 10 e 11, cujos resultados são mostrados nas Figuras 29, 30 e 31, com altura inicial de 80 mm, teor de umidade inicial próximo de 75%, foram realizados com aplicação de contrapressão de 250 kPa e com velocidades de 0,0756mm/min, 0,150mm/min e 0,301mm/min, respectivamente.

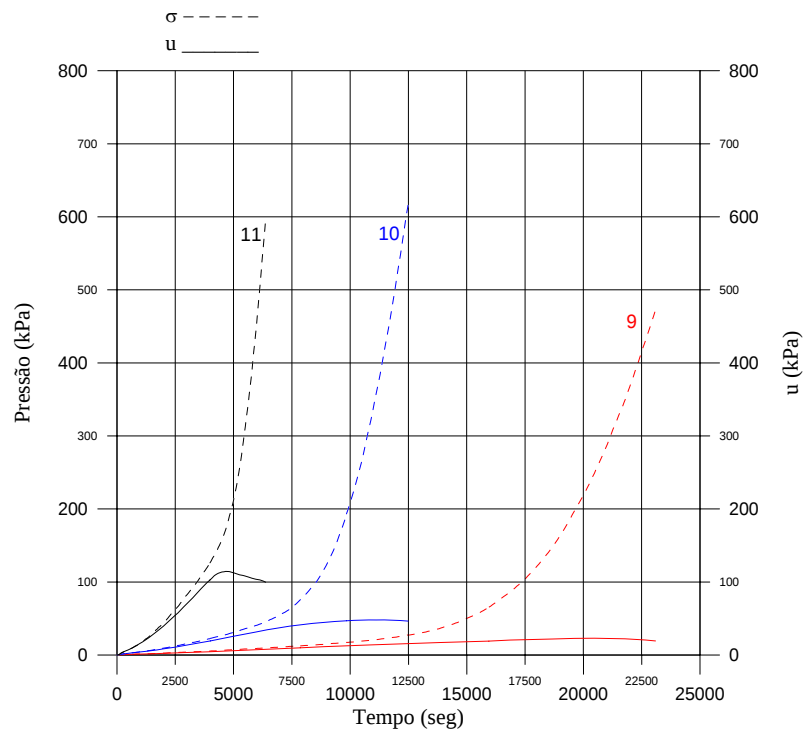


Figura 29 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 9, 10 e 11: velocidades diferentes.

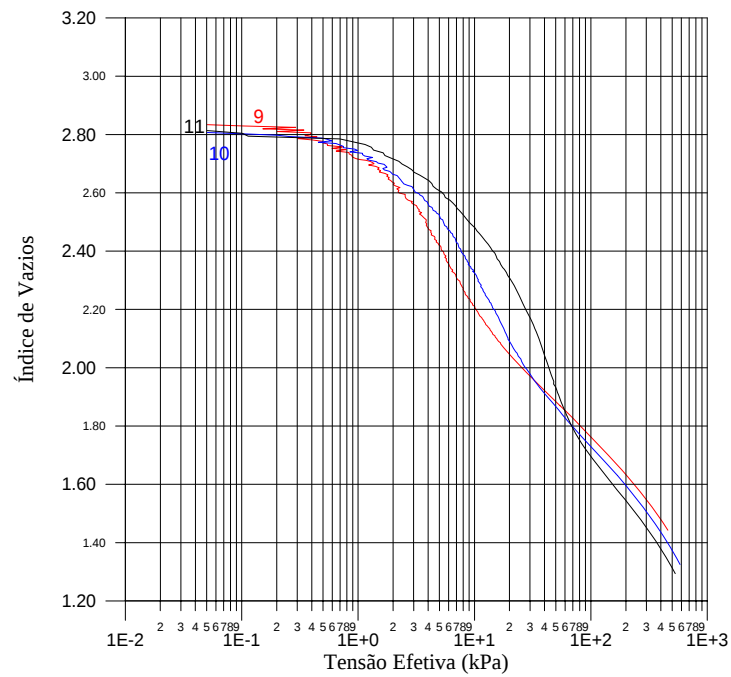


Figura 30 - Curva $e \times \sigma'$ - Ensaios 9, 10 e 11: velocidades diferentes.

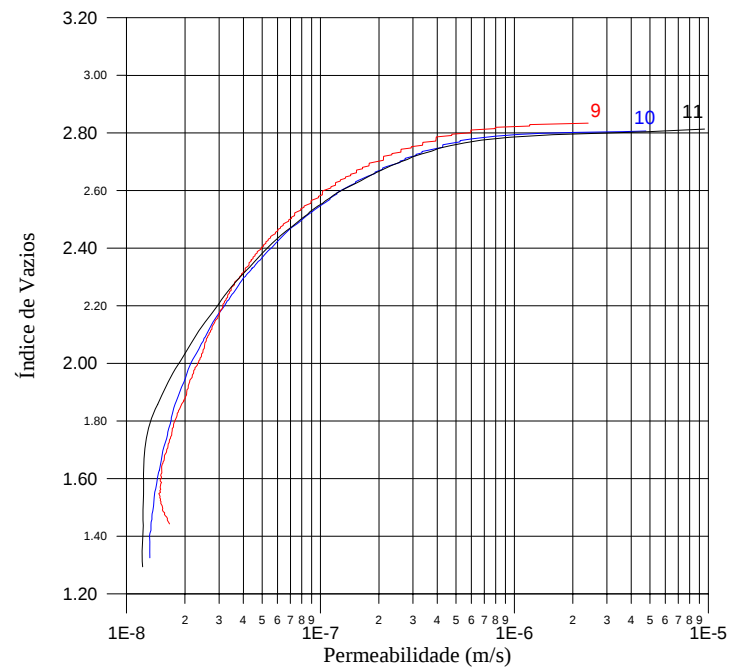


Figura 31 - Curva $e \times k$ - Ensaios 9, 10 e 11: velocidades diferentes.

Os ensaios 12, 13 e 14, cujos resultados são mostrados nas Figuras 32, 33 e 34, com altura inicial de 40 mm, teor de umidade inicial próximo de 87%, foram realizados com aplicação de contrapressão de 250 kPa e com velocidades de 0,0756mm/min, 0,150mm/min e 0,301mm/min, respectivamente.

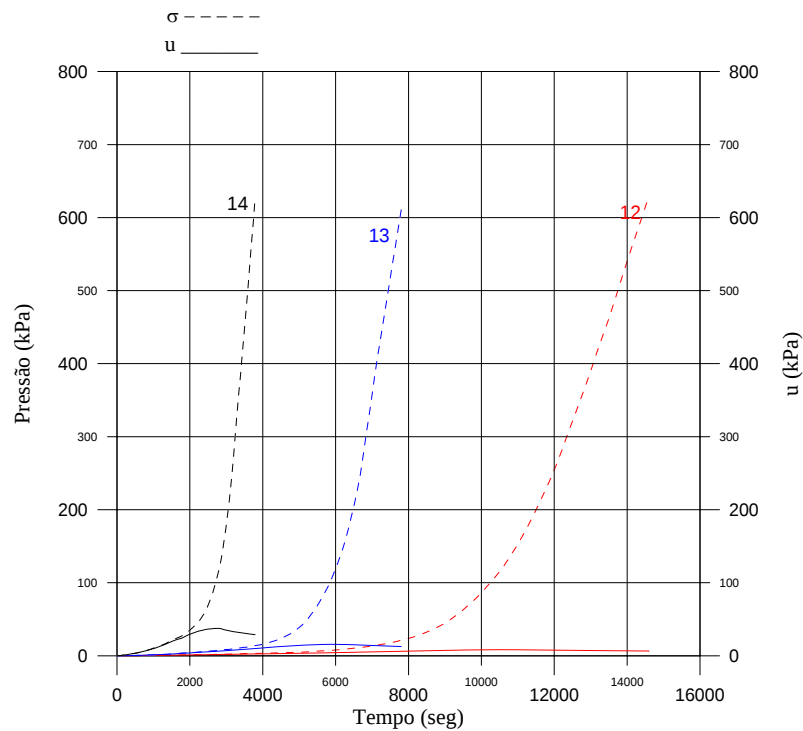


Figura 32 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 12, 13 e 14: velocidades diferentes.

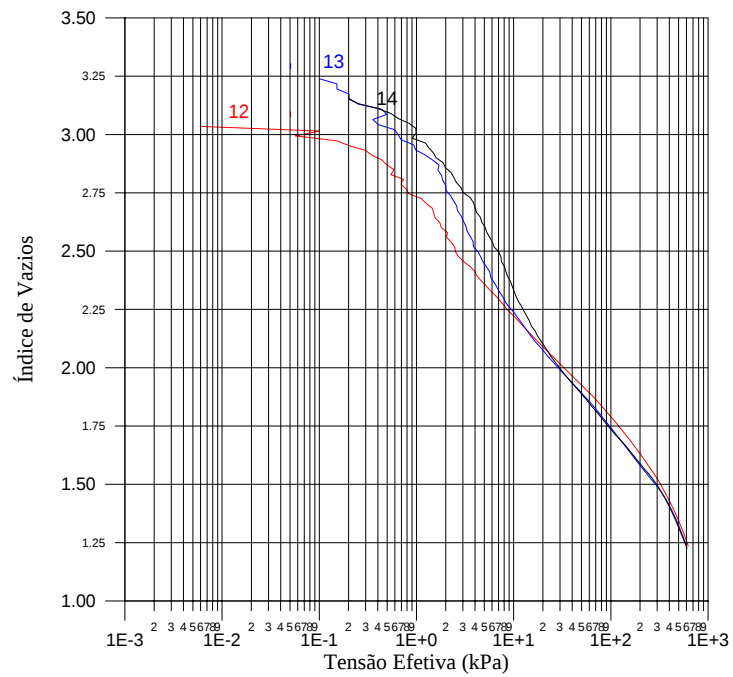


Figura 33 - Curva $e \times \sigma'$ - Ensaios 12, 13 e 14: velocidades diferentes.

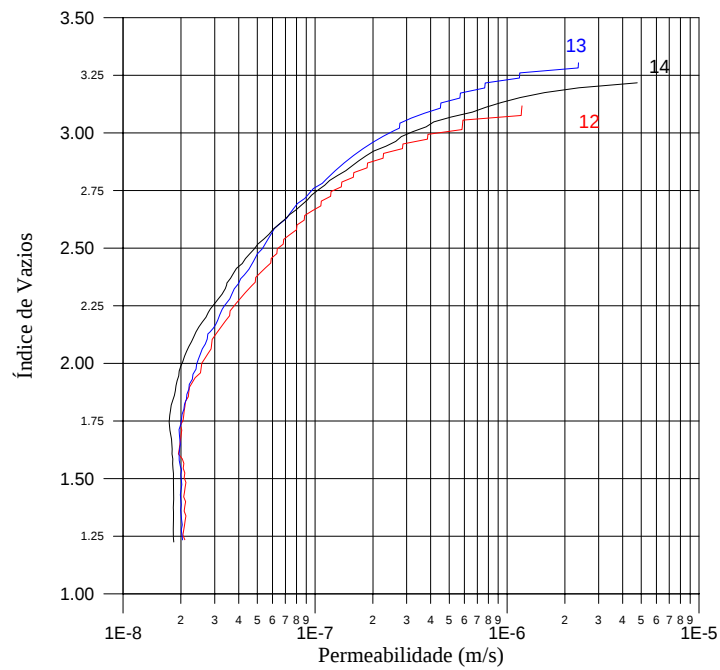


Figura 34 - Curva $e \times k$ - Ensaios 12, 13 e 14: velocidades diferentes.

Como era esperado, as curvas de $\sigma \times t$ e $u \times t$ são bastante afetadas pela velocidade adotada no ensaio. Quanto maior a velocidade, menor é a duração dos ensaios e maiores são as poro-pressões geradas na base não-drenada da amostra. No caso de menor velocidade, as poro-pressões na base ficaram pequenas, dificultando o cálculo da permeabilidade.

Também na parte final dos ensaios, sobretudo para os de maiores velocidades, observou-se uma queda da poro-pressão, não obtida por ZNIDARCIC et al. (1986). Ou seja, no final dos ensaios a geração de poro-pressão na base é menor que a velocidade de dissipação da mesma, talvez em virtude da redução de sua altura (distância de drenagem).

As curvas de compressibilidade ($e \times \sigma^{\downarrow}$) e permeabilidade ($e \times k$) não se mostraram muito sensíveis à variação de velocidade dentro do espectro utilizado neste trabalho, a não ser para o conjunto de ensaios com menor teor de umidade inicial. Na parte final destes ensaios, a permeabilidade passou a crescer à medida que o índice de vazios diminuía, o que não parece ser razoável. Este comportamento ficou mais evidenciado para os ensaios com menores velocidades.

Sabe-se, porém, que a velocidade de ensaio deve ser baixa o bastante para uma variação muito grande do índice de vazios durante o intervalo de tempo considerado, garantindo assim a validade de $g(e)$ constante na análise de ensaio proposta por ZNIDARCIC et al. (1986), apresentada no Capítulo 4, item 4.1. E, suficientemente elevada para que apareçam poro-pressões significativas (30 a 40% da tensão total) na base.

As Figuras 35 a 38 apresentam a razão $u_{base} / \sigma \times \sigma^{\downarrow}$ para todos os ensaios. Percebe-se que, com exceção do ensaio 7, realizado com uma velocidade muito alta, que apresentou um pequeno patamar inicial para depois cair exponencialmente, a forma destas curvas era muito semelhante e consistia, basicamente, de um caimento muito rápido na parte inicial do ensaio, para depois permanecerem razoavelmente constante. Desconsiderando esta parte inicial, o valor médio da razão u_{base} / σ variou de menos de 1% (ensaio 1) até cerca de 35%

(ensaio 11). A altura da amostra teve influência significativa, claramente aumentando os valores de u_{base} / σ em função do aumento da altura. O teor de umidade, para maiores variações, também influenciou na redução dos valores de u_{base} / σ em virtude de menores teores de umidade.

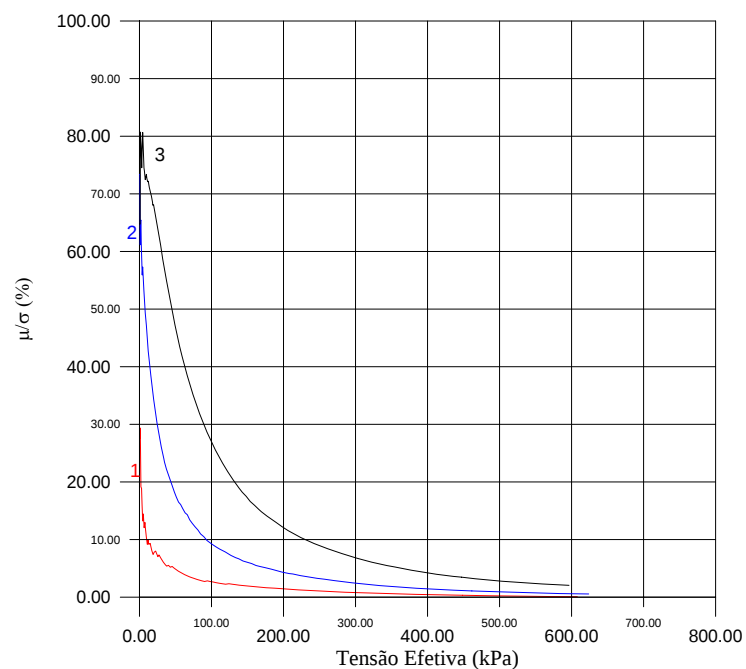


Figura 35 - Curvas $u_{base} / \sigma \times \sigma^l$ - Ensaios 1, 2 e 3: velocidades diferentes.

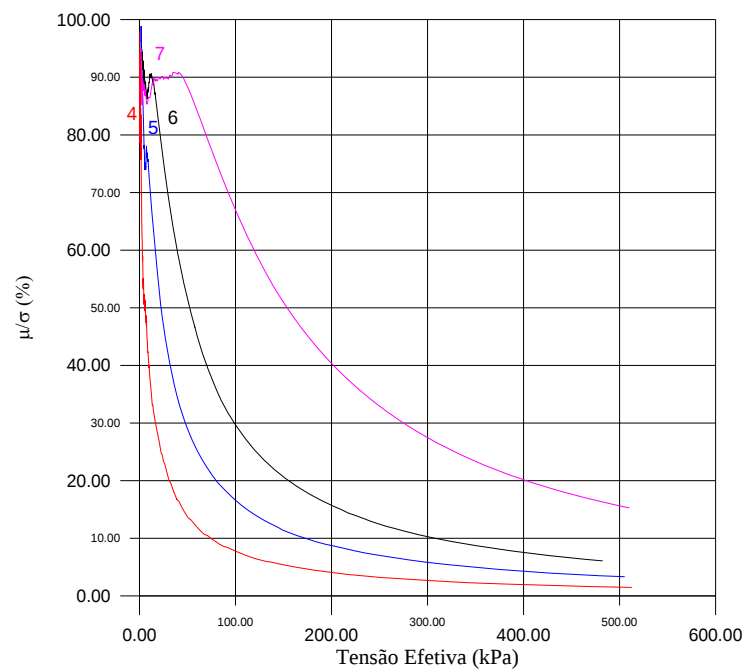


Figura 36 - Curvas $u_{base} / \sigma \times \sigma^l$ - Ensaios 4, 5, 6 e 7: velocidades diferentes.

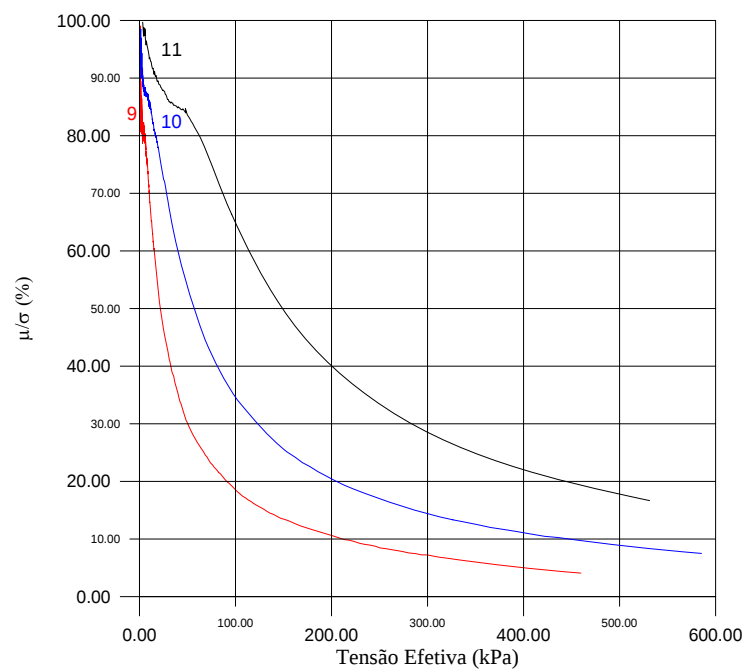


Figura 37 - Curvas $u_{base} / \sigma \times \sigma^l$ - Ensaios 9, 10 e 11: velocidades diferentes.

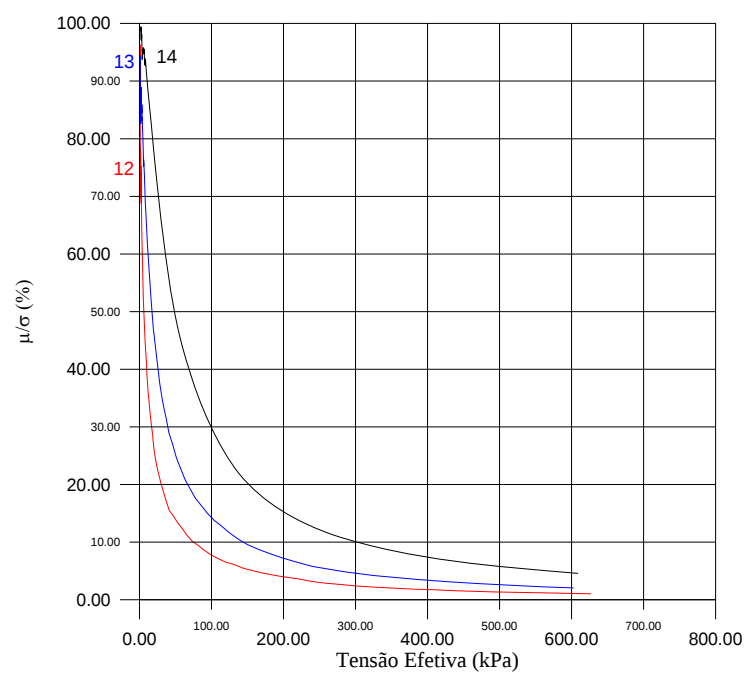


Figura 38 - Curvas $u_{base} / \sigma \times \sigma^l$ - Ensaios 12, 13 e 14: velocidades diferentes.

6.2.2. Análise da influência do teor de umidade inicial

Nas figuras que se seguem são apresentados os resultados de ensaios com velocidade, altura inicial e condição de aplicação de contrapressão iguais, diferenciando-se apenas quanto ao teor de umidade inicial da amostra.

Os ensaios 1 e 4, cujos resultados são mostrados nas Figuras 39, 40, 41, 42 e 43, com a mesma velocidade (0,0756 mm/min) e altura inicial de 40mm, foram realizados sem aplicação de contrapressão e com teores de umidade inicial de 55% e 83%, respectivamente.

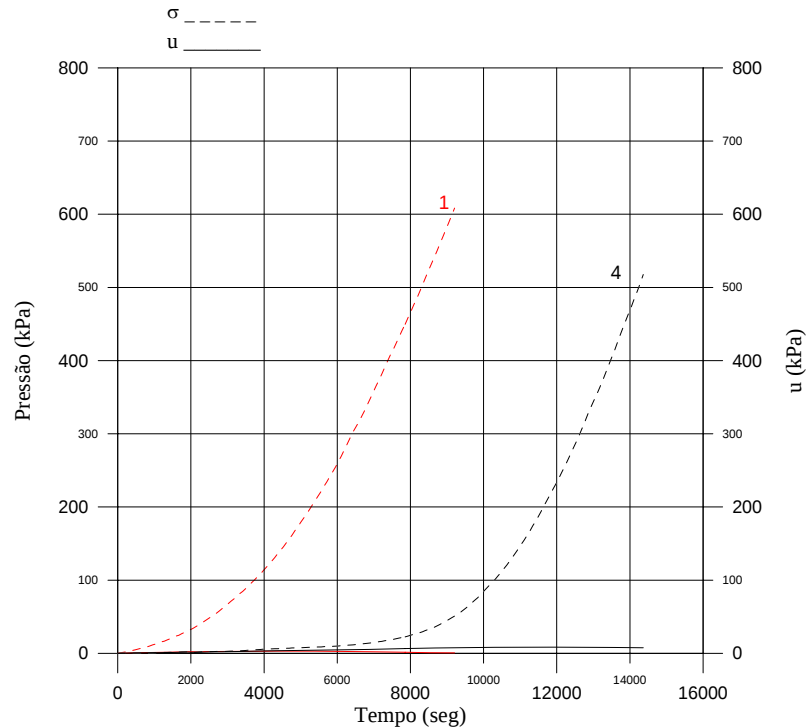


Figura 39 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 1 e 4: $v = 0,0756$ mm/min.

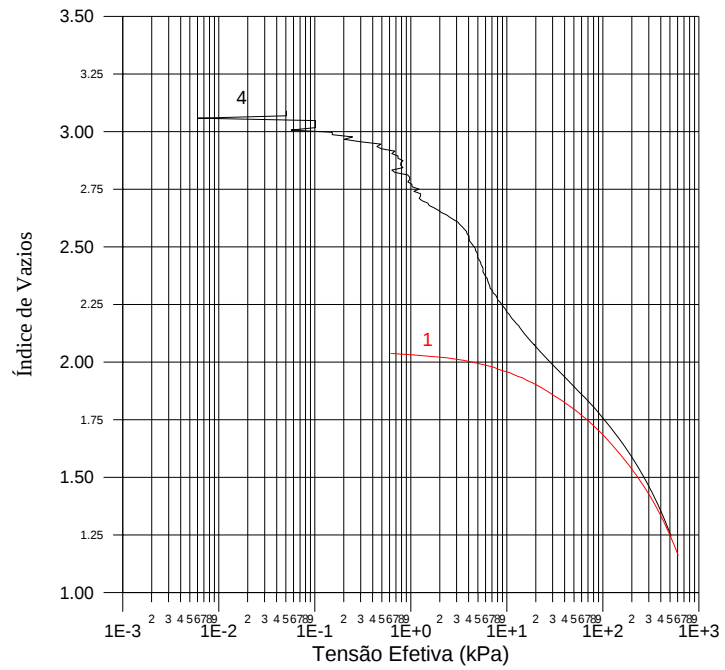


Figura 40 - Curva $e \times \sigma^l$ - Ensaios 1 e 4: $v = 0,0756$ mm/min.

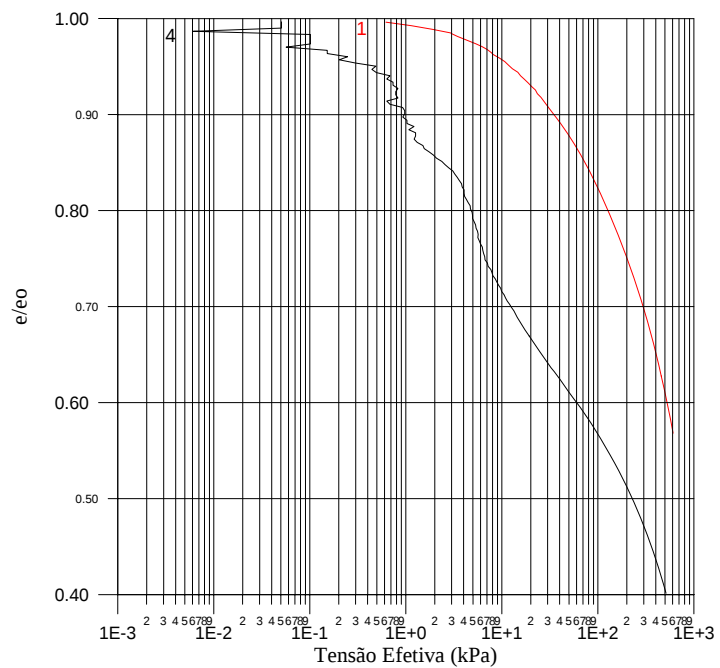


Figura 41 - Curva $e/e_0 \times \sigma^l$ - Ensaios 1 e 4: $v = 0,0756$ mm/min.

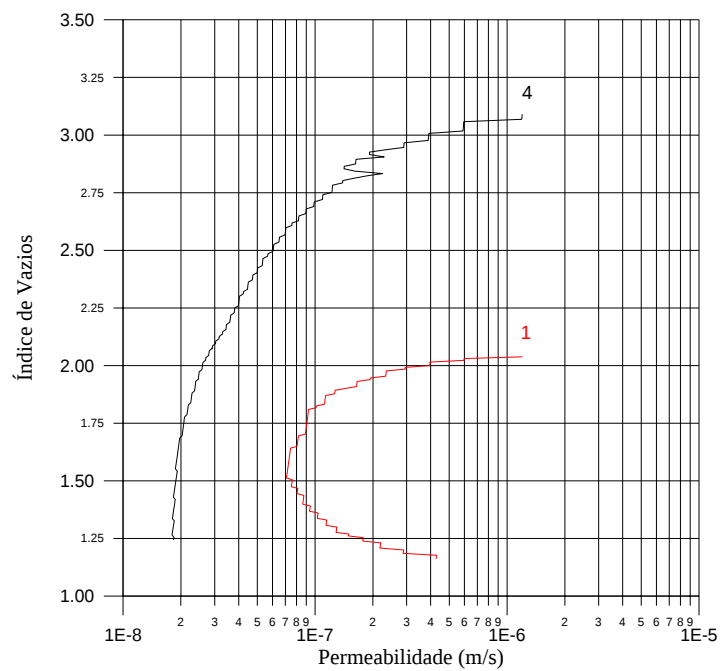


Figura 42 - Curva $e \times k$ - Ensaio 1 e 4: $v = 0,0756$ mm/min.

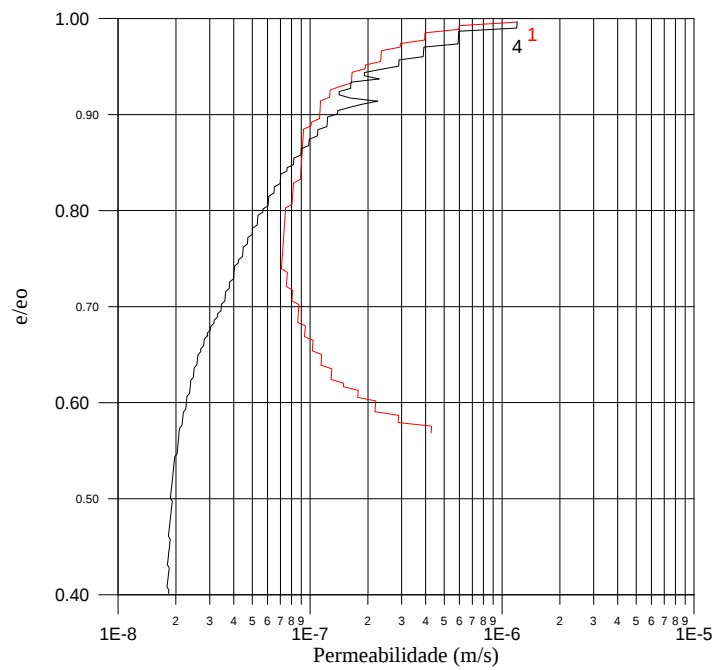


Figura 43 - Curva $e/e_0 \times k$ - Ensaio 1 e 4: $v = 0,0756$ mm/min.

Os ensaios 2 e 5, cujos resultados são mostrados nas Figuras 44, 45, 46, 47 e 48, com a mesma velocidade (0,150mm/min) e altura inicial de 40 mm, foram realizados sem aplicação de contrapressão e com teores de umidade inicial de 54% e 82%, respectivamente.

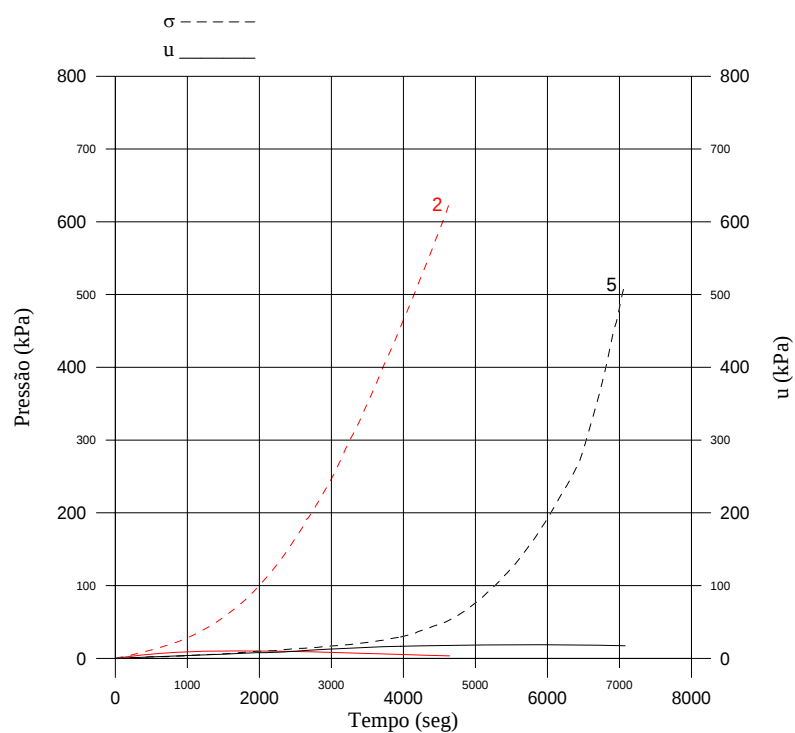


Figura 44 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 2 e 5: $v = 0,150$ mm/min.

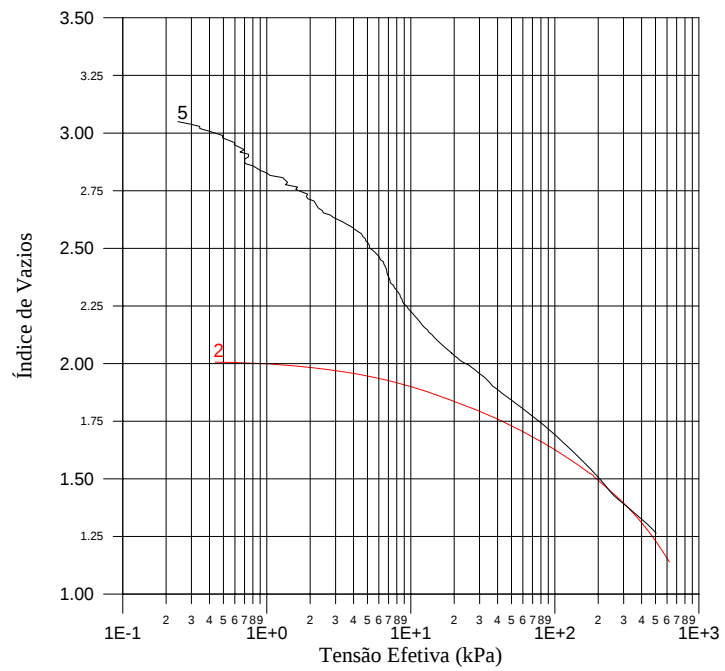


Figura 45 - Curva $e \times \sigma'$ - Ensaios 2 e 5: $v = 0,150$ mm/min.

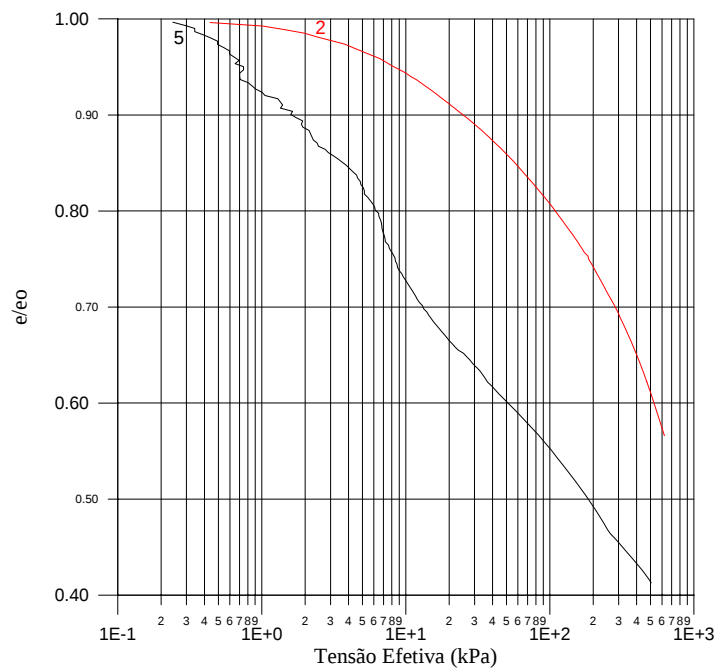


Figura 46 - Curva $e/e_0 \times \sigma'$ - Ensaios 2 e 5: $v = 0,150$ mm/min.

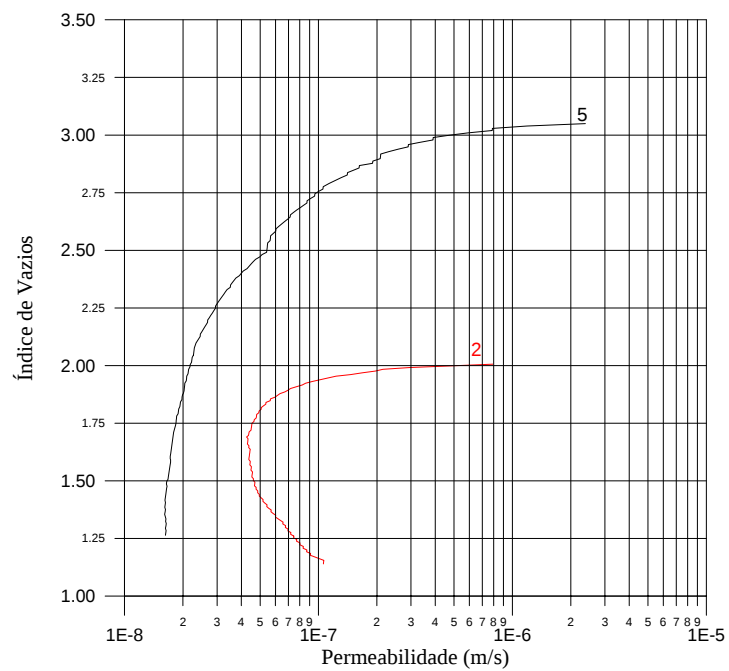


Figura 47 - Curva $e \times k$ - Ensaios 2 e 5: $v = 0,150$ mm/min.

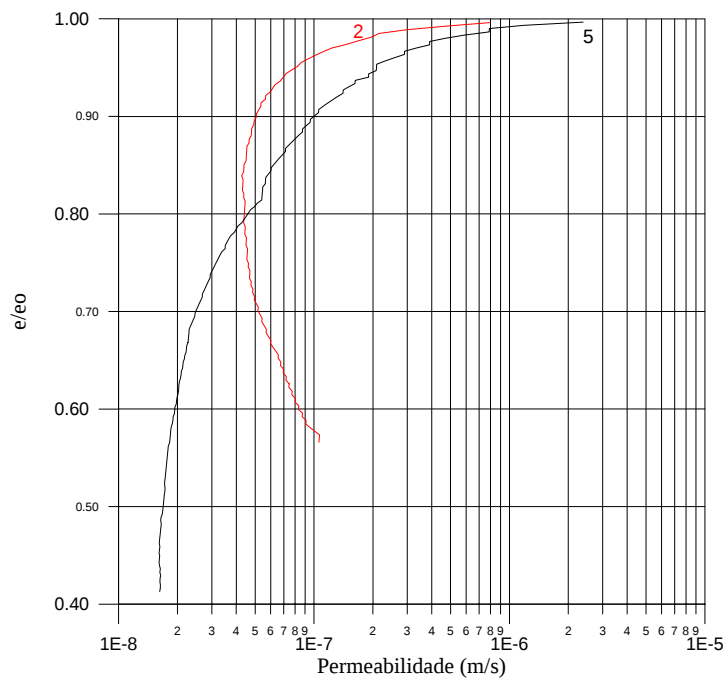


Figura 48 - Curva $e/e_0 \times k$ - Ensaios 2 e 5: $v = 0,150$ mm/min.

Os ensaios 3 e 6, cujos resultados são mostrados nas Figuras 49, 50, 51, 52 e 53, com a mesma velocidade (0,301 mm/min) e altura inicial de 40 mm, foram realizados sem aplicação de contrapressão e com teores de umidade inicial de 54% e 82%, respectivamente.

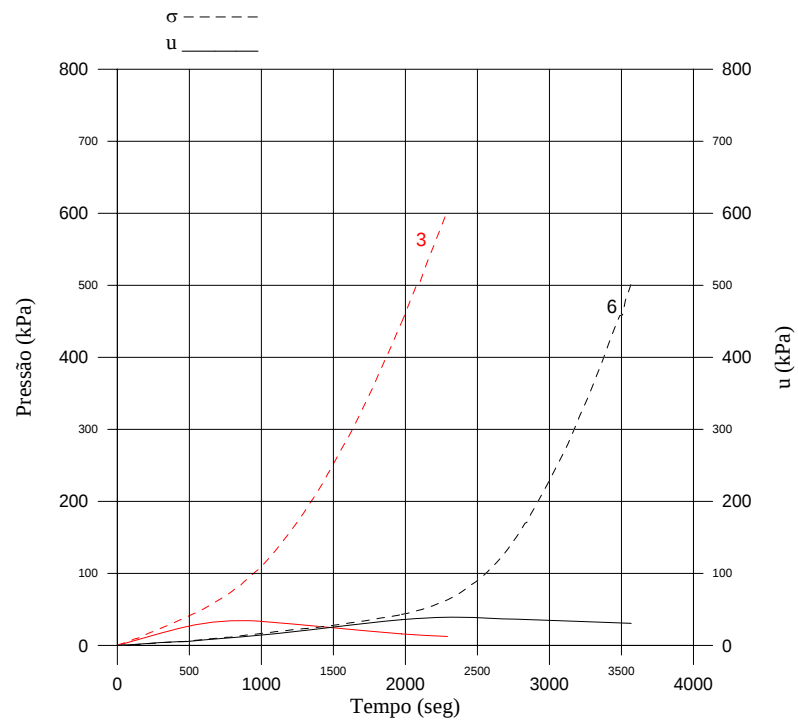


Figura 49 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 3 e 6: $v = 0.301$ mm/min.

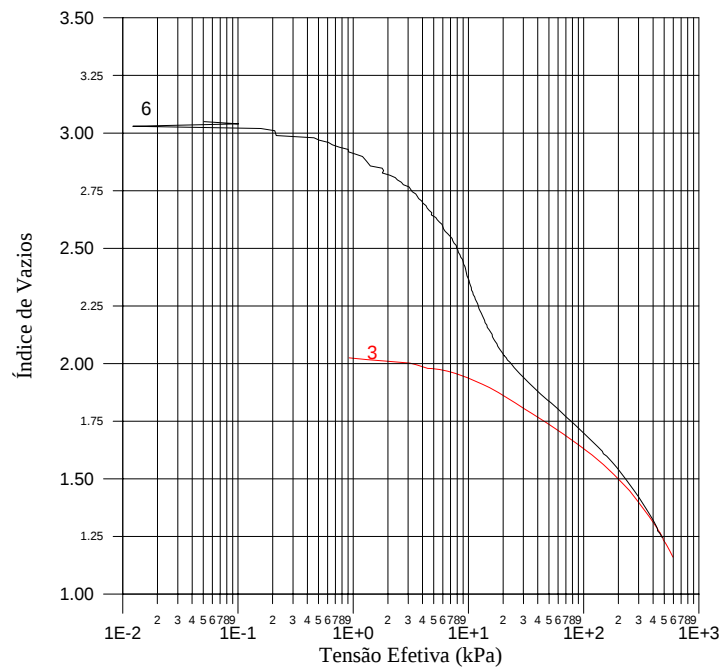


Figura 50 - Curva $e \times \sigma^l$ - Ensaios 3 e 6: $v = 0,301$ mm/min.

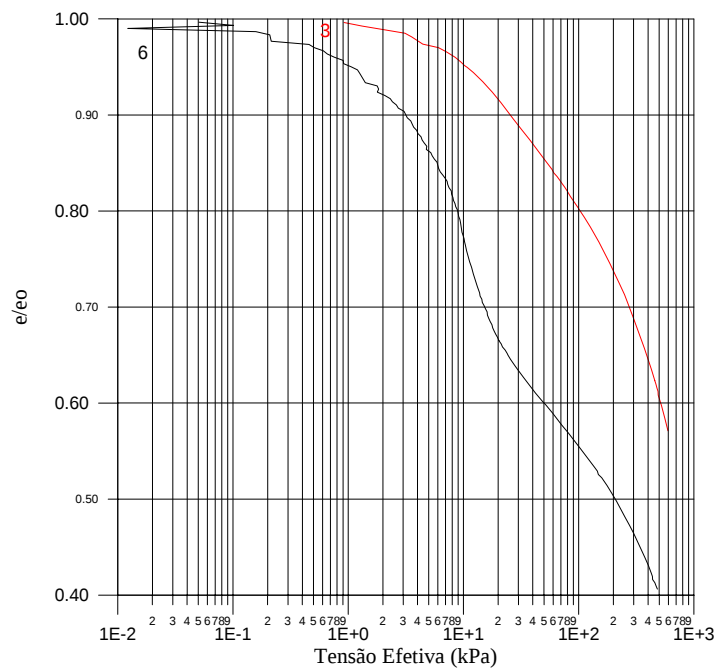


Figura 51 - Curva $e/e_0 \times \sigma^l$ - Ensaios 3 e 6: $v = 0,301$ mm/min.

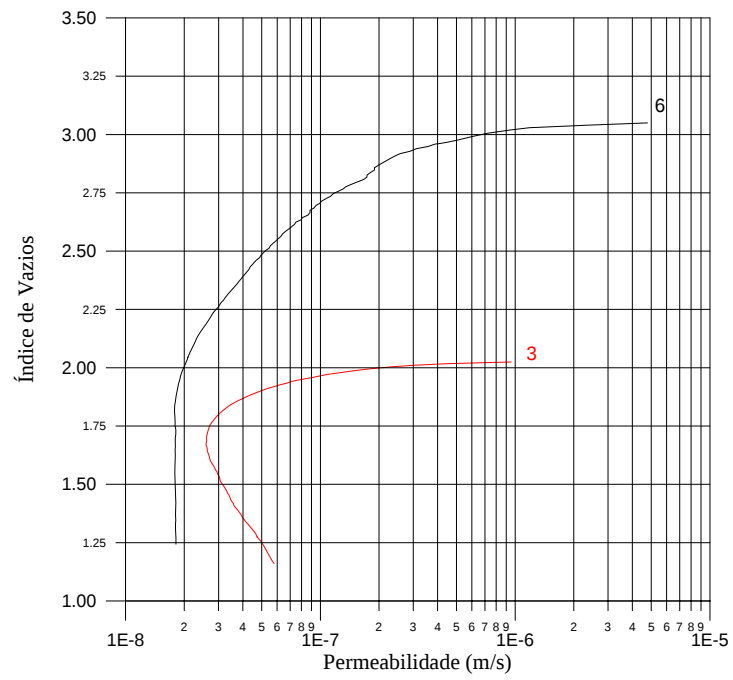


Figura 52 - Curva $e \times k$ - Ensaios 3 e 6: $v = 0,301$ mm/min.

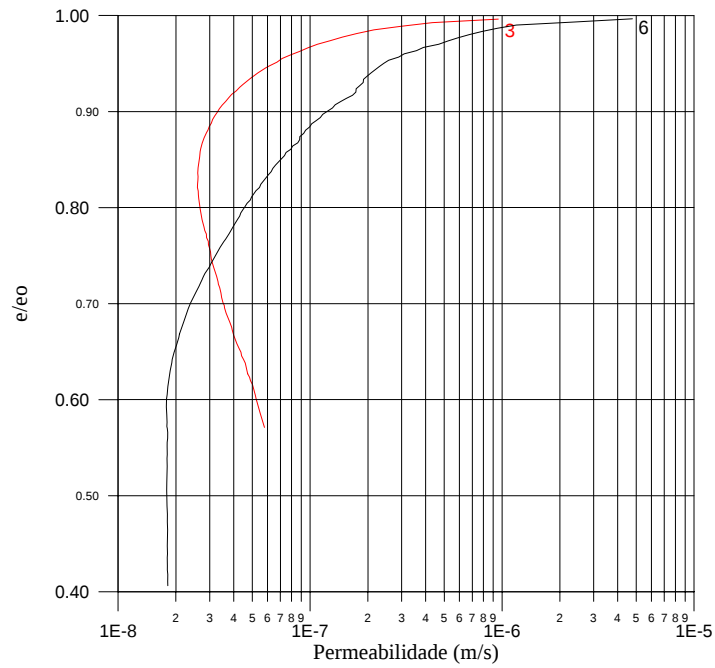


Figura 53 - Curva $e/e_o \times k$ - Ensaios 3 e 6: $v = 0,301$ mm/min.

Os ensaios 8 e 9, cujos resultados são mostrados nas Figuras 54, 55, 56, 57 e 58, com a mesma velocidade (0,0756 mm/min) e altura inicial de 80 mm, foram realizados com aplicação de contrapressão e apresentaram teores de umidade inicial de 98% e 76%, respectivamente.

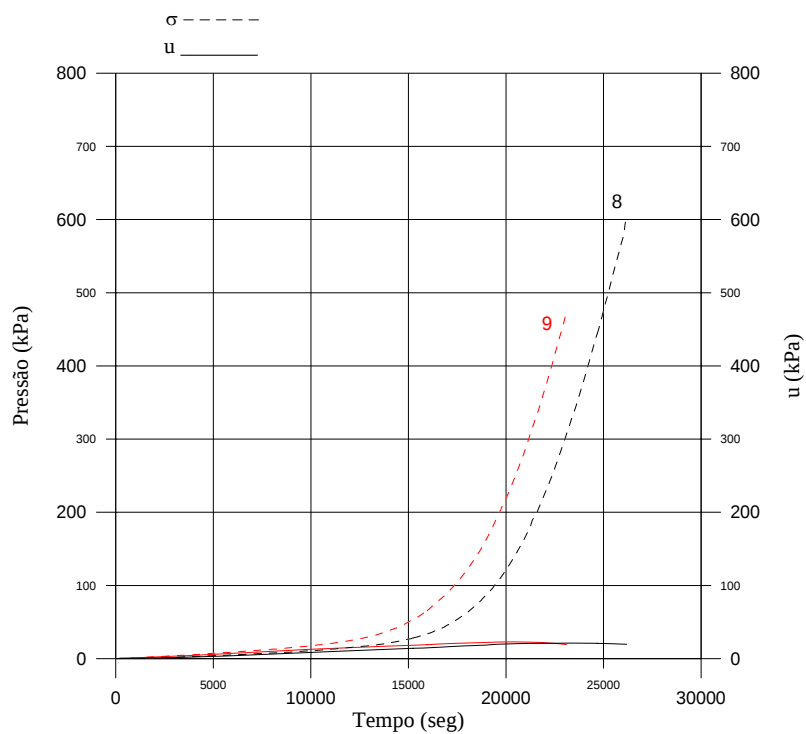


Figura 54 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 8 e 9: $v = 0,0756$ mm/min.

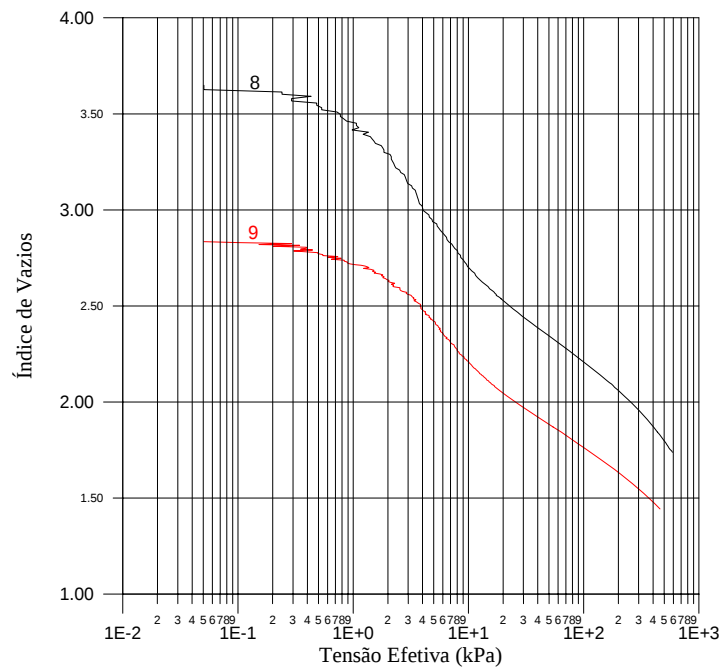


Figura 55 - Curva $e \times \sigma'$ - Ensaios 8 e 9: $v = 0,0756$ mm/min.

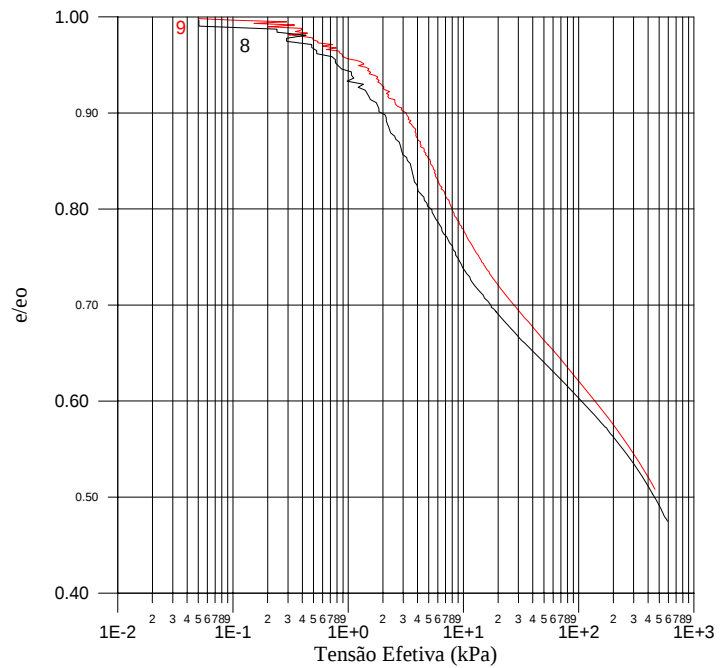


Figura 56 - Curva $e/e_0 \times \sigma'$ - Ensaios 8 e 9: $v = 0,0756$ mm/min.

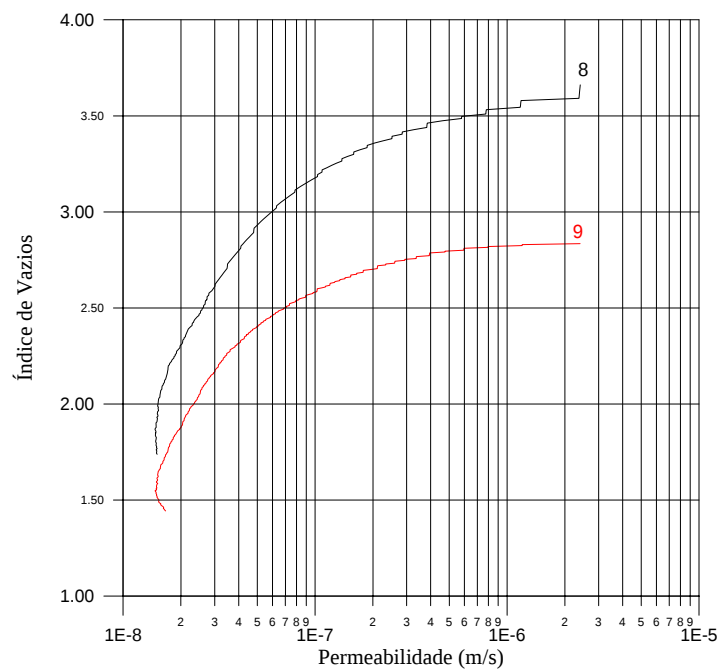


Figura 57 - Curva $e \times k$ - Ensaios 8 e 9: $v = 0,0756$ mm/min.

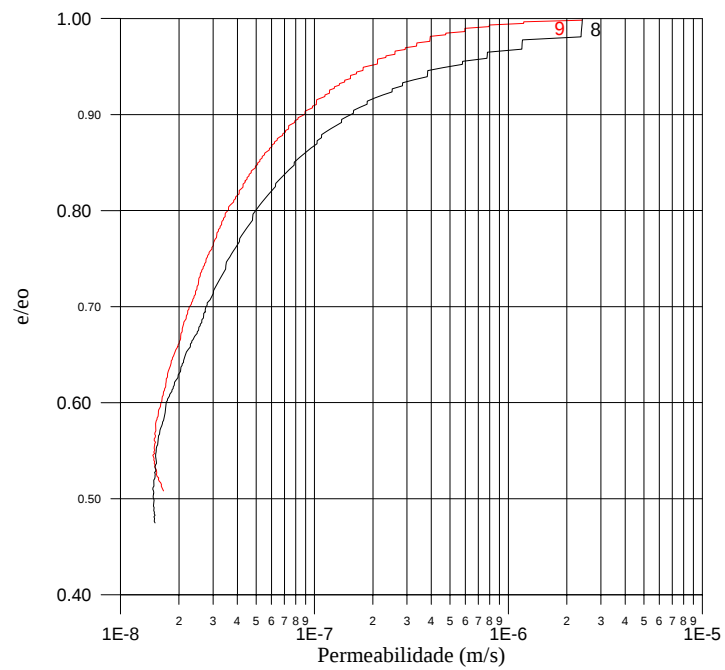


Figura 58 - Curva $e/e_0 \times k$ - Ensaios 8 e 9: $v = 0,0756$ mm/min.

Com base nas comparações apresentadas nas figuras anteriores, para estudar a influência do teor de umidade inicial da amostra, chegou-se às seguintes conclusões:

Com relação as curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$, a variação na forma é muito pequena, aumentando-se apenas o tempo de duração dos ensaios à medida que o teor de umidade inicial aumenta. Isto ocorre em razão de a amostra mais mole ter que se deformar mais para atingir o mesmo índice de vazios da amostra inicialmente mais consistente.

As curvas de compressibilidade e permeabilidade são únicas para um dado material, independentemente do teor de umidade inicial escolhido. De fato, para menores diferenças destes teores de umidade, observaram-se curvas muito semelhantes (Figuras 56 e 58) quando normalizavam-se os ensaios em função do índice de vazio inicial (e_o). Entretanto, de acordo com as comparações feitas com os ensaios de teor de umidade inicial igual a 54%, não se conseguiu uma curva única do comportamento constitutivo do material.

6.2.3. Análise da influência da contrapressão

Nas figuras que se seguem são apresentados os resultados de ensaios com velocidade e altura inicial das amostras iguais e teores de umidade inicial próximos, diferenciando-se apenas quanto às condições de aplicação de contrapressão.

Os ensaios 4 e 12, cujos resultados são mostrados nas Figuras 59, 60 e 61, com a mesma velocidade (0,0756 mm/min), altura inicial de 40 mm, teores de umidade inicial próximos, foram realizados sem e com aplicação de contrapressão, respectivamente.

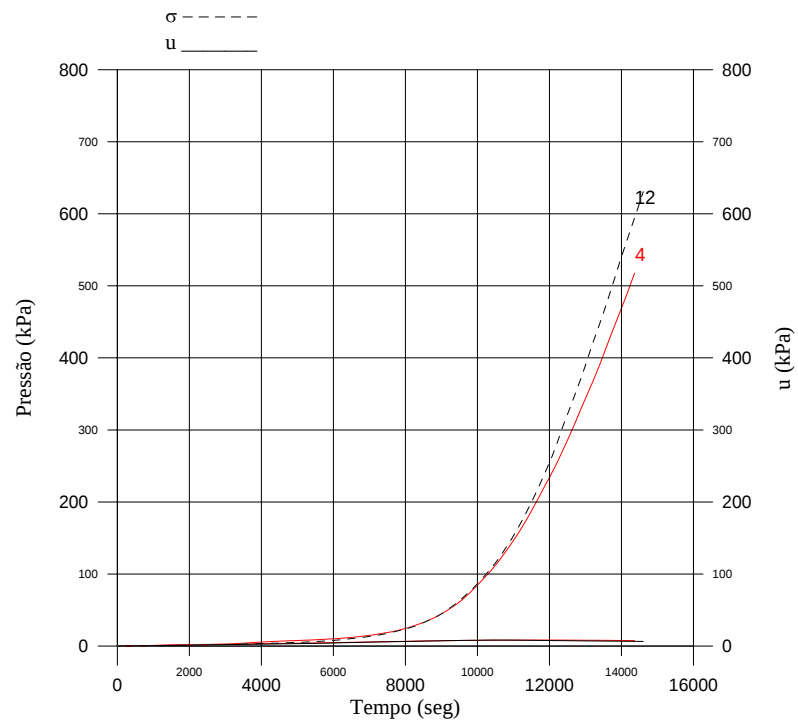


Figura 59 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaio 4 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.

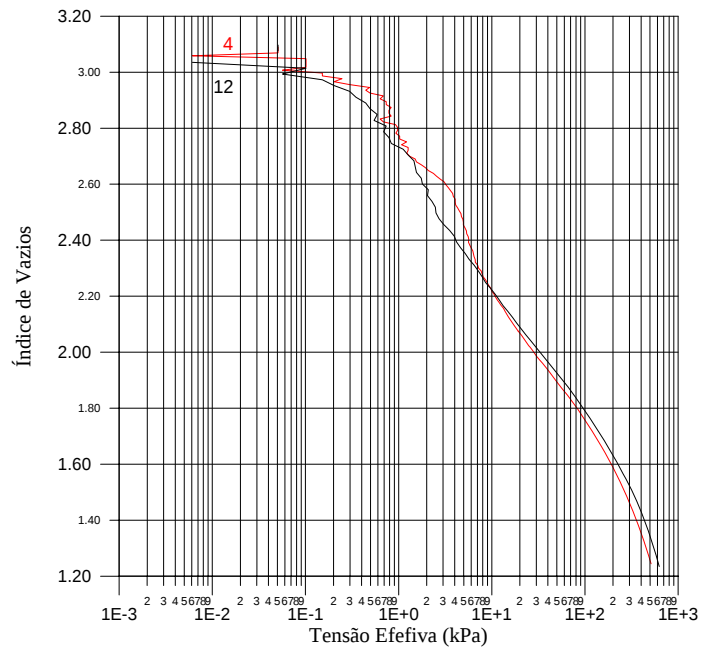


Figura 60 - Curva $e \times \sigma^l$ - Ensaios 4 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.

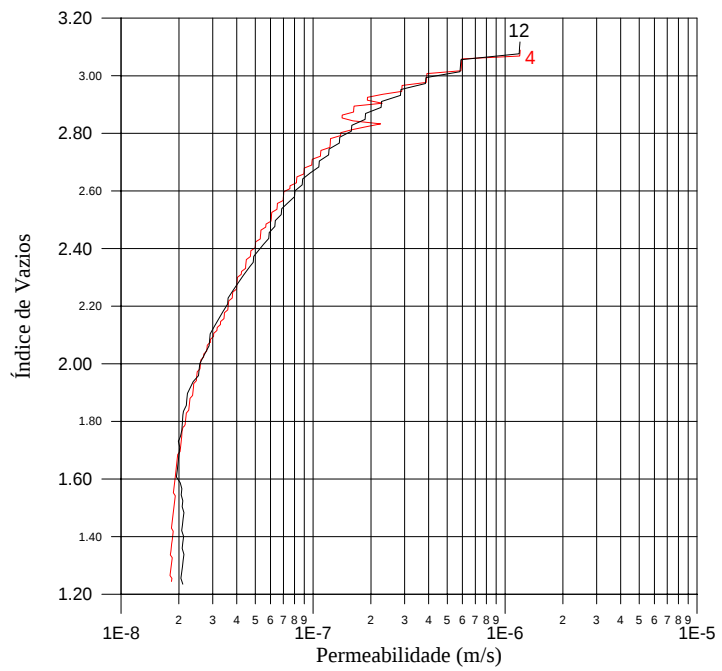


Figura 61 - Curva $e \times k$ - Ensaios 4 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.

Os ensaios 5 e 13, cujos resultados são mostrados nas Figuras 62, 63 e 64, com a mesma velocidade (0,150 mm/min), altura inicial de 40 mm, teores de umidade inicial próximos, foram realizados sem e com aplicação de contrapressão, respectivamente.

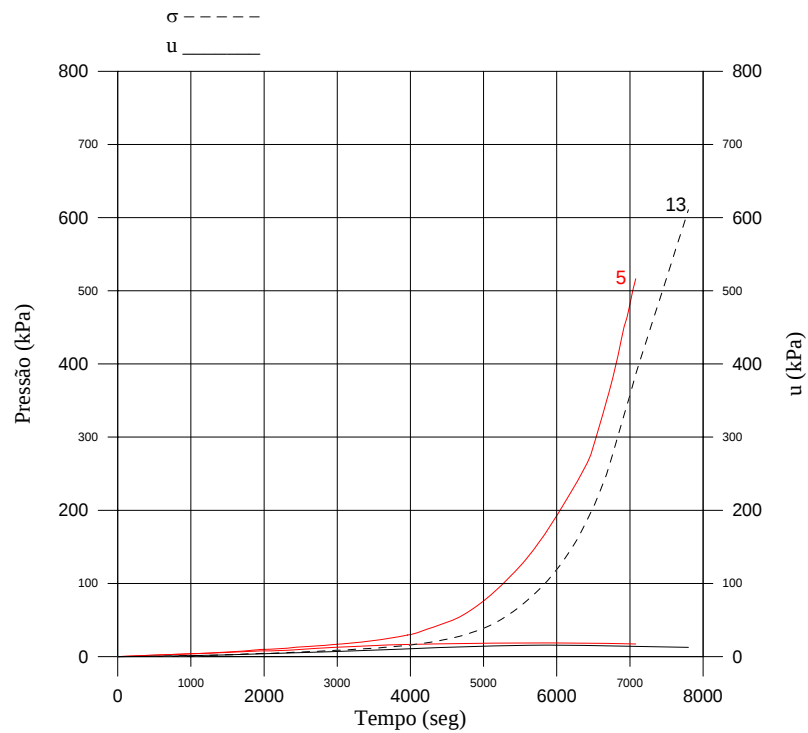


Figura 62 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 5 e 13: $v = 0,150$ mm/min.

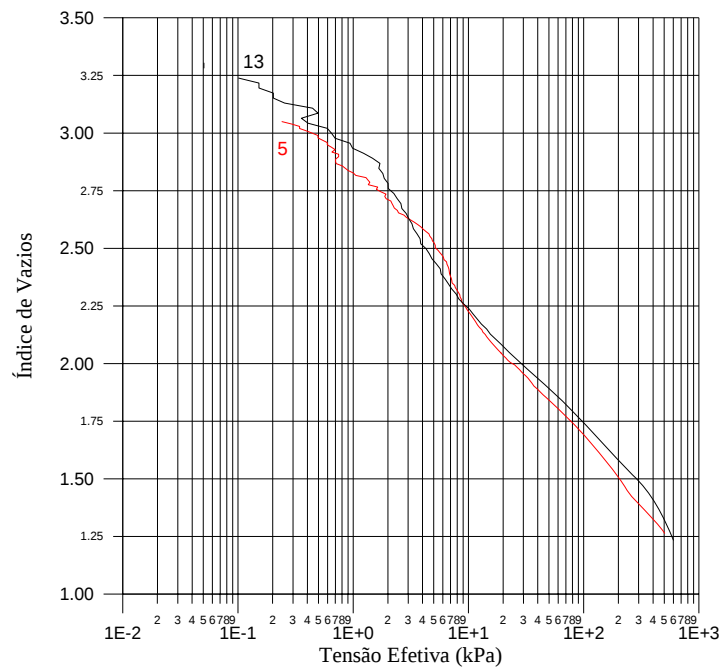


Figura 63 - Curva $e \times \sigma'$ - Ensaios 5 e 13: $v = 0,150$ mm/min.

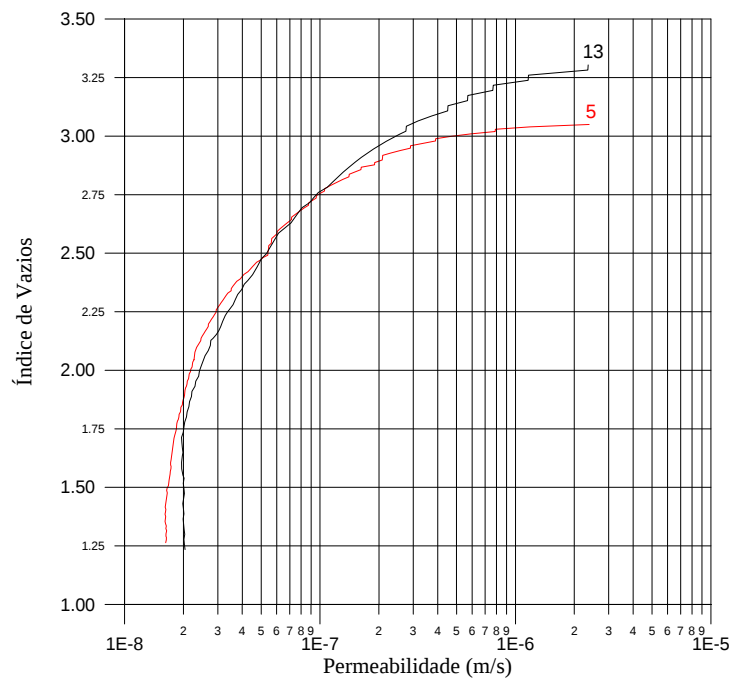


Figura 64 - Curva $e \times k$ - Ensaios 5 e 13: $v = 0,150$ mm/min.

Os ensaios 6 e 14, cujos resultados são mostrados nas Figuras 65, 66 e 67, com a mesma velocidade (0,301 mm/min), altura inicial de 40 mm e teores de umidade inicial próximos, foram realizados sem e com aplicação de contrapressão, respectivamente.

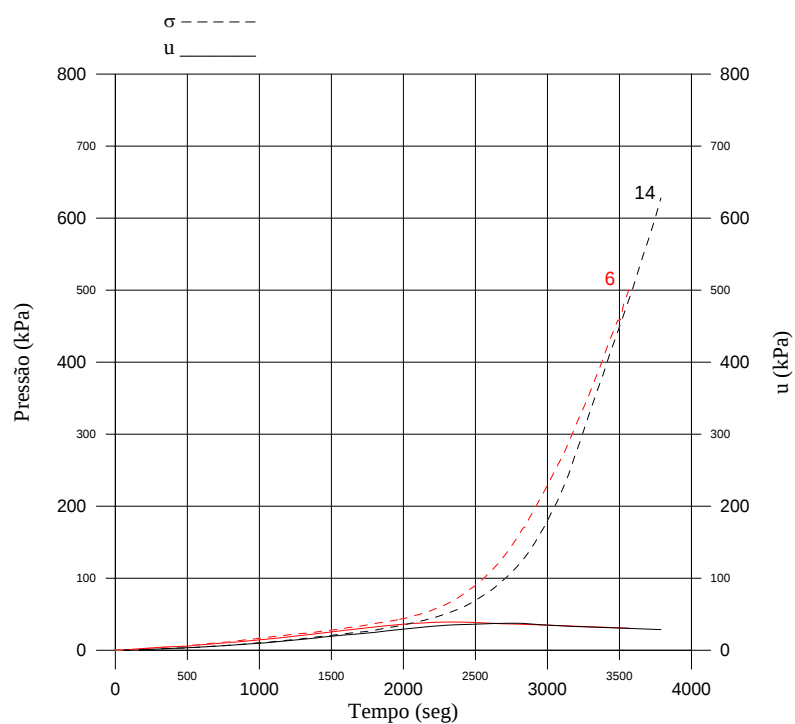


Figura 65 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 6 e 14: $v = 0,301$ mm/min.

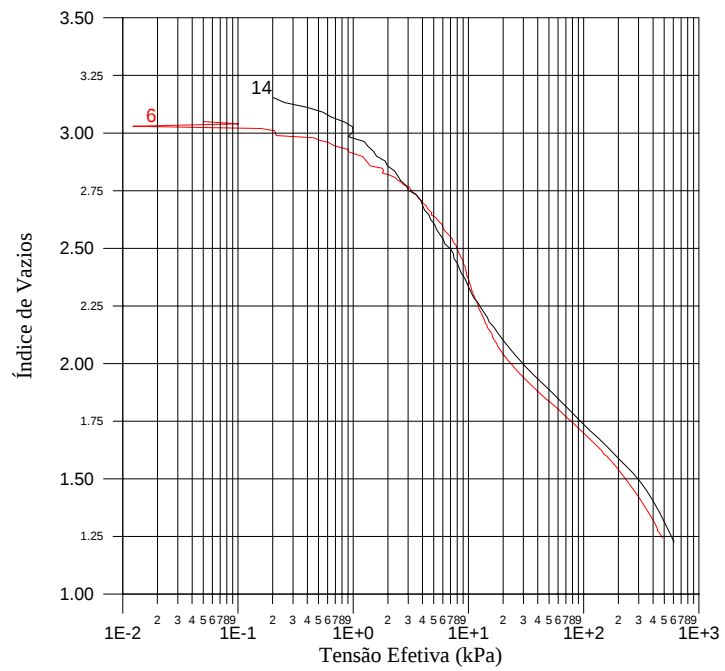


Figura 66 - Curva $e \times \sigma'$ - Ensaios 6 e 14: $v = 0,301$ mm/min.

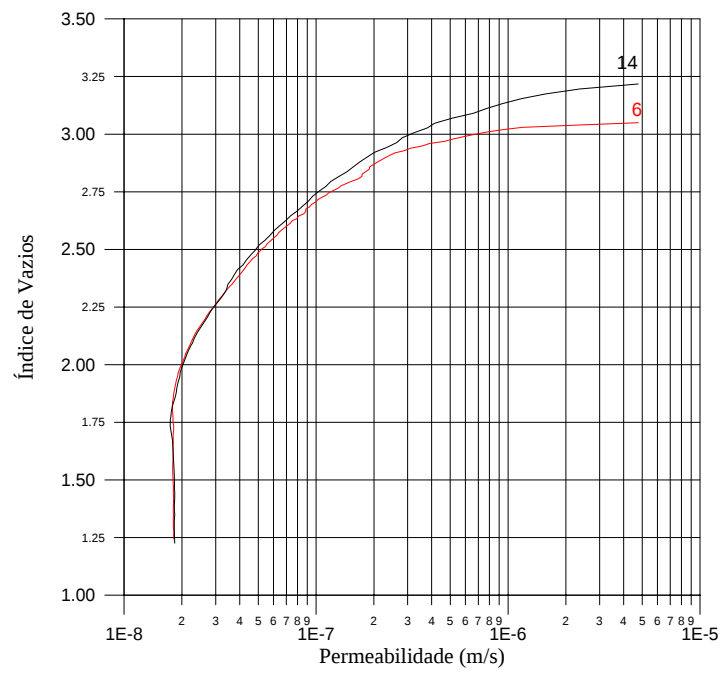


Figura 67 - Curva $e \times k$ - Ensaios 6 e 14: $v = 0,301$ mm/min.

Pode-se observar que as curvas de $\sigma \times t$ e $u \times t$ tendem a uma única curva, distanciando-se um pouco para os ensaios 5 e 13, em virtude de uma variação mais significativa nos teores de umidade inicial das amostras utilizadas.

Ao contrário do recomendado por ZNIDARCIC et al. (1986), nota-se, pelos gráficos mostrados anteriormente, que a aplicação ou não de contrapressão durante os ensaios não influenciou as curvas de compressibilidade ($e \times \sigma^v$) e permeabilidade ($e \times k$). As variações observadas no início do ensaio, para alguns casos, devem-se a pequenas diferenças nos teores de umidade inicial.

6.2.4. Análise da influência da altura da amostra

Nas figuras que se seguem são apresentados os resultados de ensaios com velocidades e condição de aplicação de contrapressão iguais e teores de umidade inicial semelhantes, diferenciando-se apenas quanto às alturas iniciais das amostras.

Os ensaios 9 e 12, cujos resultados são mostrados nas Figuras 68, 69 e 70, com a mesma velocidade (0,0756 mm/min) e teores de umidade inicial próximos, foram realizados com aplicação de contrapressão e apresentam alturas iniciais das amostras de 80 e 40 mm, respectivamente.

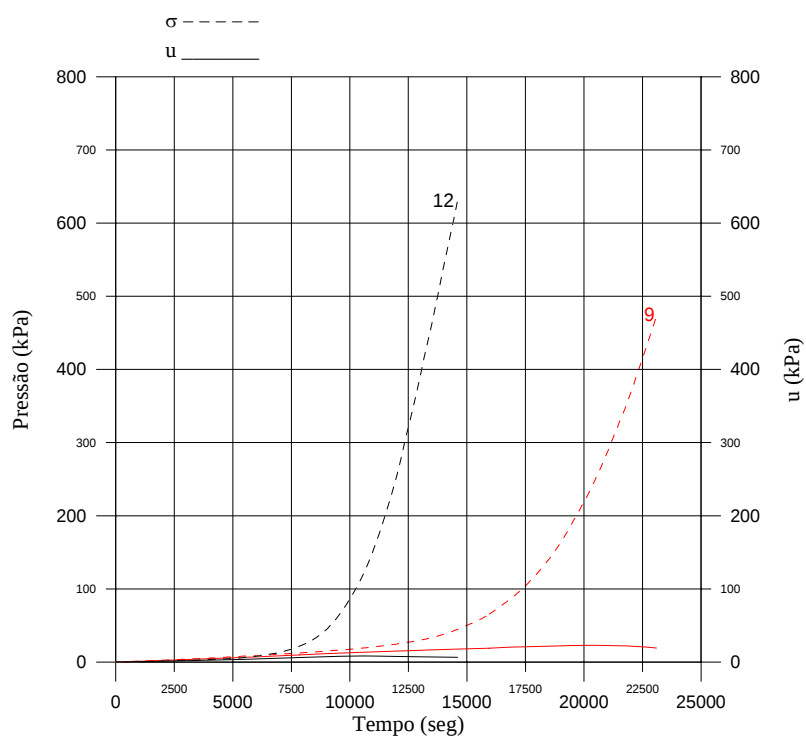


Figura 68 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 9 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.

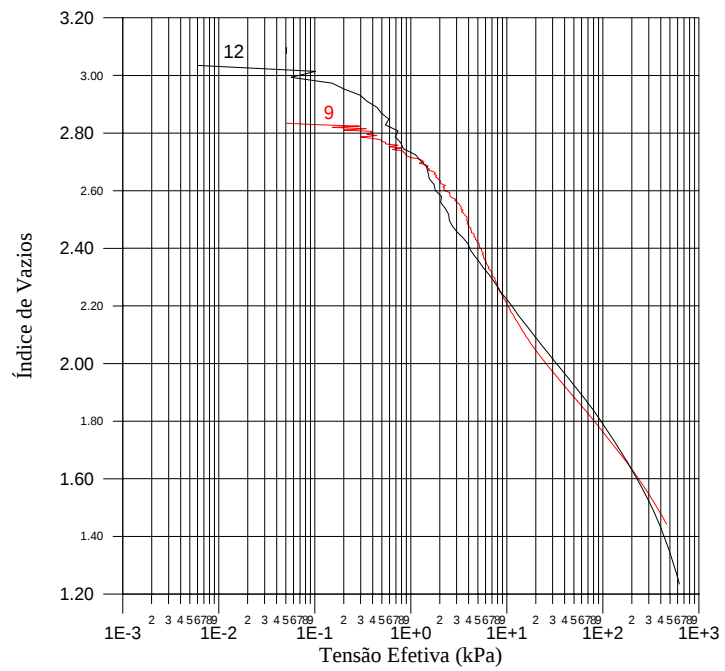


Figura 69 - Curva $e \times \sigma'$ - Ensaios 9 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.

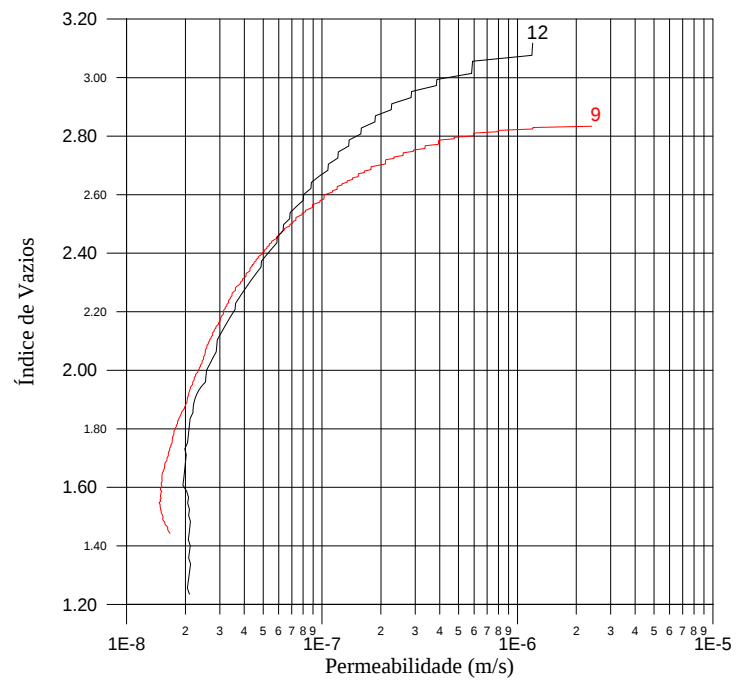


Figura 70 - Curva $e \times k$ - Ensaios 9 e 12: $v = 0,0756$ mm/min.

Os ensaios 10 e 13, cujos resultados são mostrados nas Figuras 71, 72 e 73, com a mesma velocidade (0,150 mm/min) e teores de umidade inicial próximos, foram realizados com aplicação de contrapressão e apresentaram alturas iniciais das amostras de 80 e 40 mm, respectivamente.

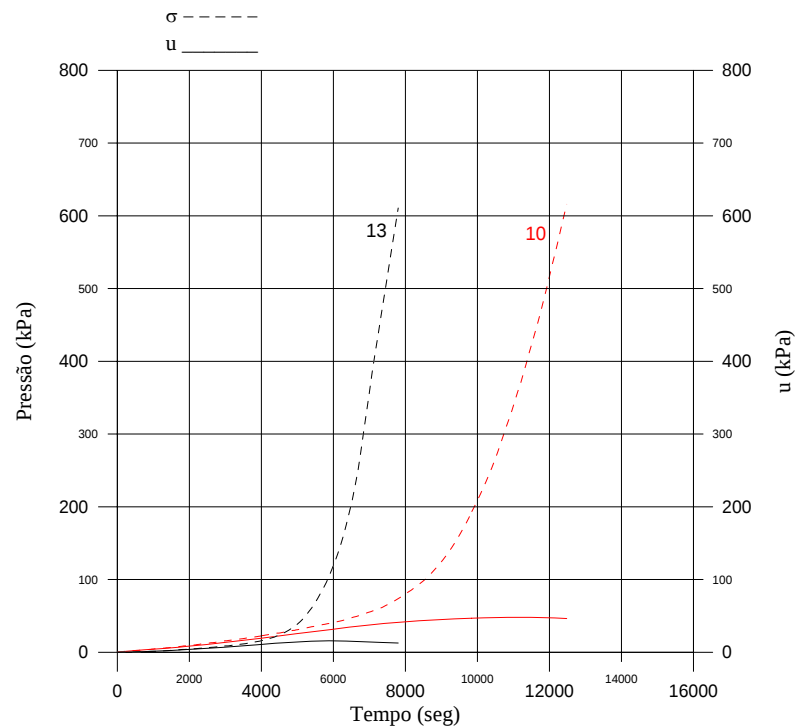


Figura 71 - Curva $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 10 e 13: $v = 0,150$ mm/min.

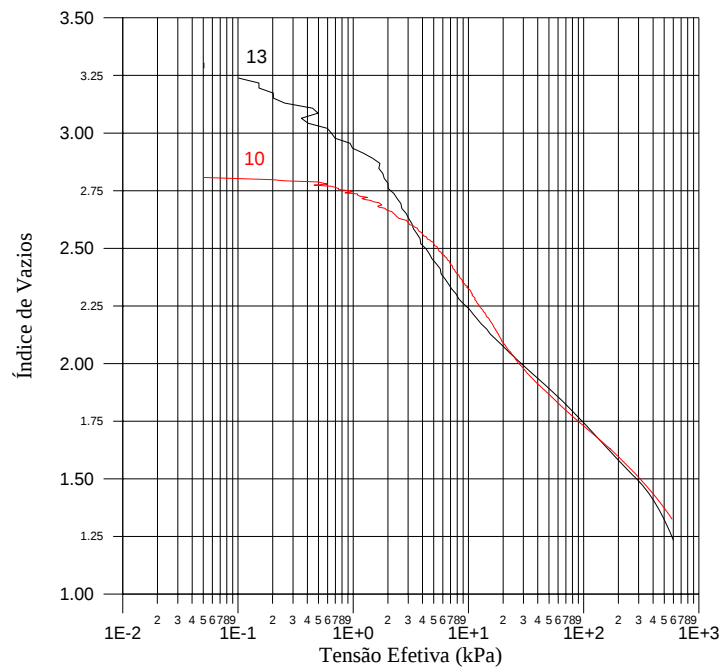


Figura 72 - Curva $e \times \sigma'$ - Ensaios 10 e 13: $v = 0,150$ mm/min.

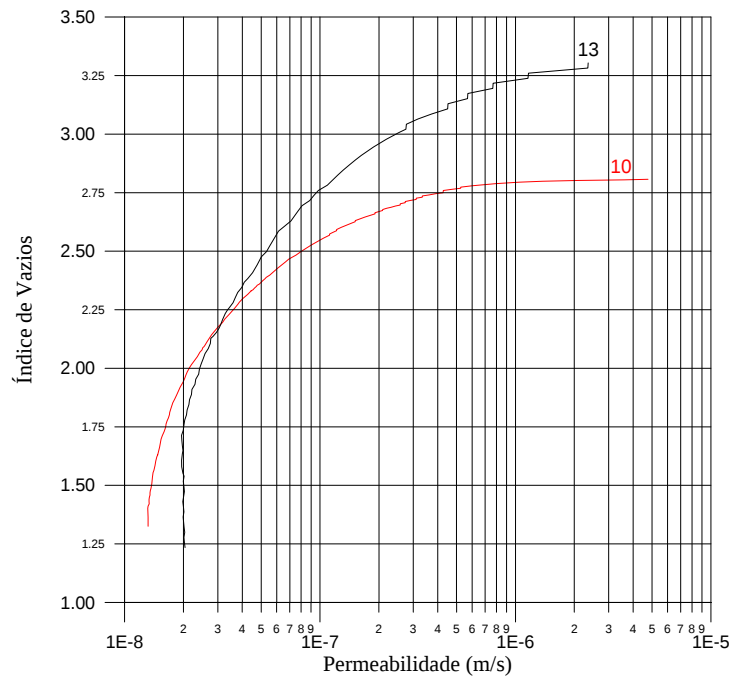


Figura 73 - Curva $e \times k$ - Ensaios 10 e 13: $v = 0,150$ mm/min.

Os ensaios 11 e 14, cujos resultados são mostrados nas Figuras 74, 75 e 76, com a mesma velocidade (0,301 mm/min) e teores de umidade inicial próximos, foram realizados com aplicação de contrapressão e apresentaram alturas iniciais das amostras de 80 e 40 mm, respectivamente.

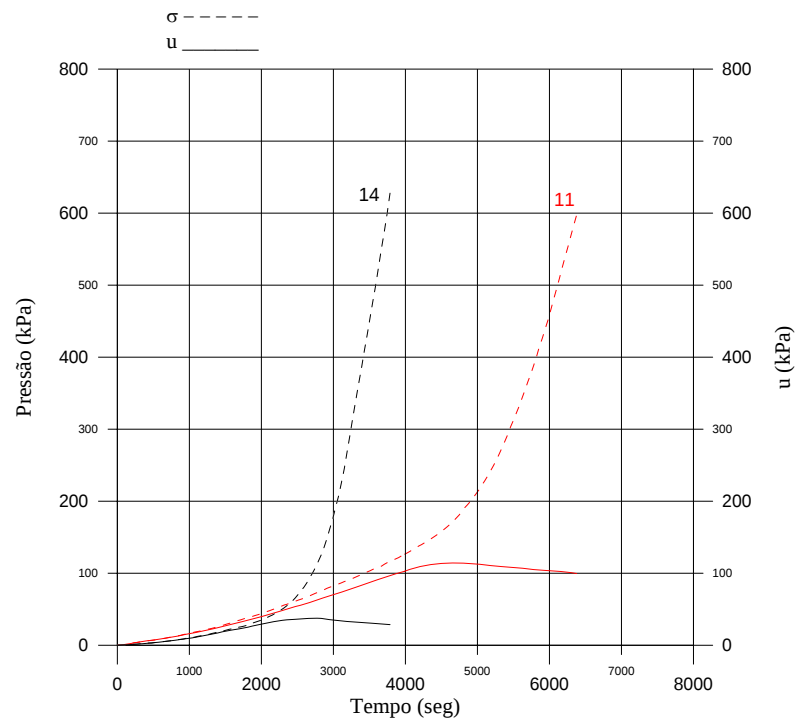


Figura 74 - Curvas $\sigma \times t$ e $u \times t$ - Ensaios 11 e 14: $v = 0,301$ mm/min.

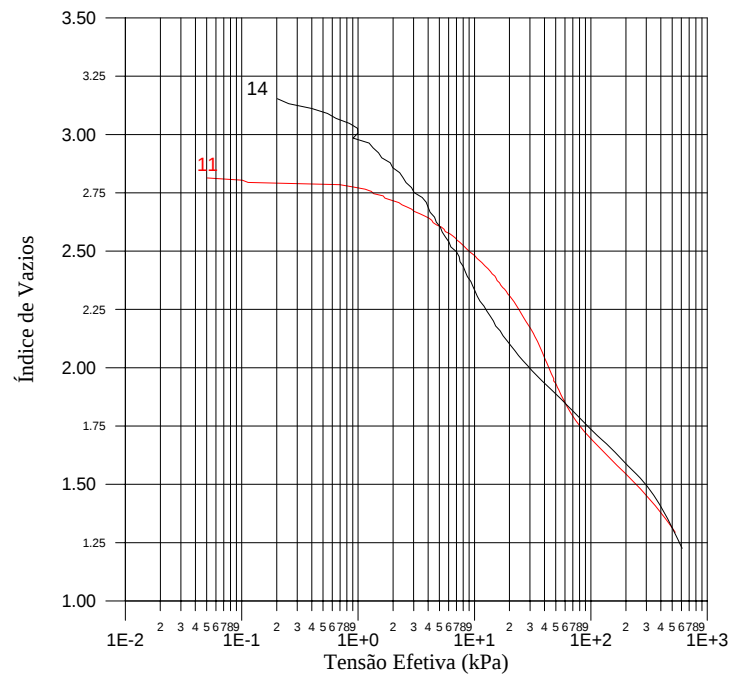


Figura 75 - Curva $e \times \sigma'$ - Ensaios 11 e 14: $v = 0,301$ mm/min.

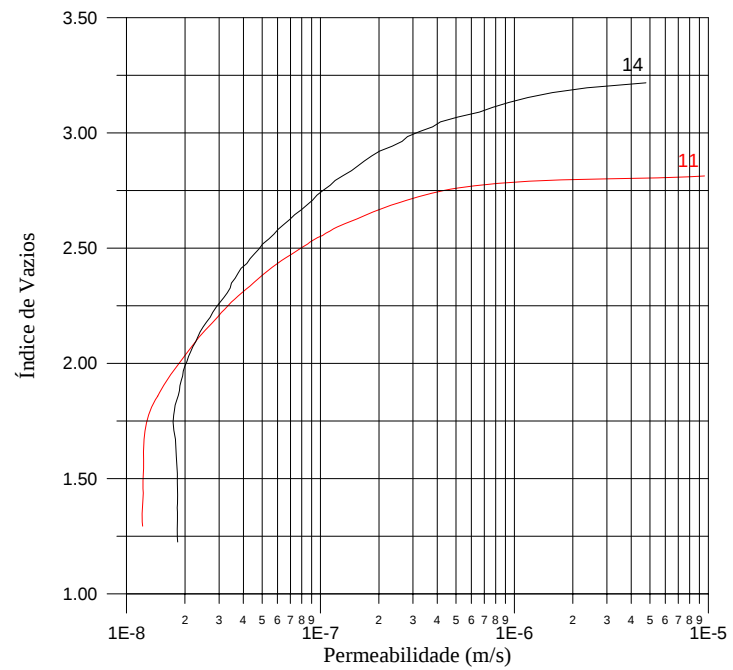


Figura 76 - Curva $e \times k$ - Ensaios 11 e 14: $v = 0,301$ mm/min.

Conforme previsto, os ensaios com amostra de maior altura foram mais demorados, pois necessitavam de maior deslocamento do pistão de aplicação de carga para que se atingisse a mesma consistência dos ensaios com amostras de menor altura. Fora este aspecto, o desenvolvimento das curvas $\sigma \times t$ e $\mu \times t$ foi independente da altura inicial da amostra.

Da mesma forma, as curvas de compressibilidade e permeabilidade foram semelhantes, permitindo concluir que a altura da amostra teve influência desprezível nos resultados dos ensaios.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1. Conclusões

A presente dissertação teve como objetivos desenvolver um equipamento para a realização de ensaios de adensamento com taxa de deslocamento constante em lamas, bem como a análise dos dados experimentais obtidos pela teoria de adensamento com grandes deformações.

Com relação ao equipamento desenvolvido, conclui-se que o ensaio oedométrico tipo CRD demonstrou ser muito interessante para a obtenção das características de deformabilidade e permeabilidade de solos muito moles. O equipamento é simples de ser desenvolvido e pode funcionar com sucesso, utilizando apenas instrumentação comum, como anel dinamométrico e extensômetro mecânico, freqüentemente encontrados em laboratórios de geotecnia. Além disso, o ensaio é de fácil realização e, geralmente, de curta duração.

Quanto ao método de análise proposto por ZNIDARCIC et al. (1986), sua implementação, apesar de simples, requer uma solução numérica de uma equação a partir dos dados de laboratório para se conseguir um intervalo de tempo adimensional (ΔT). Para cada ensaio, a equação tem que ser resolvida diversas vezes, tendo-se observado que, com freqüência, não se conseguia

encontrar uma solução. Em face do exposto, procurou-se uma alternativa, optando-se por desenvolver uma análise simplificada, semelhante à proposta por MARTINEZ et al. (1987). Tendo em vista que uma comparação entre as curvas de compressibilidade e permeabilidade obtidas por meio desta análise simplificada e por intermédio da teoria de adensamento com grandes deformações não produziu diferenças significativas, conclui-se que a análise simplificada é uma alternativa razoável em relação àquela mais rigorosa, proposta por ZNIDARCIC et al. (1986).

Quanto aos resultados dos ensaios realizados com o rejeito da mina da Mutuca, conclui-se que:

- ao contrário do que se esperava, as curvas de compressibilidade e permeabilidade não se mostraram sensíveis às variações de velocidade, pelo menos dentro da faixa de valores adotados neste trabalho;
- como era esperado, a altura inicial da amostra influenciou apenas no tempo de duração do ensaio, não tendo tido qualquer influência nos demais resultados do mesmo;
- pequenas variações do teor de umidade influenciaram o início das curvas de compressibilidade e permeabilidade, notando-se que as curvas praticamente coincidiam quando normalizadas em relação ao índice de vazios inicial de cada ensaio;
- ao contrário do recomendado por ZNIDARCIC et al. (1986), observou-se que o uso de contrapressão não influenciou os resultados dos ensaios;
- a inesperada queda da poro-pressão, verificada na parte final da maioria dos ensaios, ocasionou comportamento estranho nas curvas de permeabilidade que indicavam permeabilidade constante, ou nos ensaios com menor teor de

umidade, permeabilidade crescente, à medida que o índice de vazios diminuía. Não se conseguiu encontrar uma justificativa para este comportamento. Suspeita-se que ela possa ter três motivos. Primeiro, algum problema de falta de saturação, apesar das providências tomadas como: uso de contrapressão, aumento das dimensões das canaletas da base da célula aonde se encaixa a pedra-porosa, fervura da pedra porosa, etc. Segundo, alguma variação, eventualmente brusca, da velocidade da prensa, sobretudo no final do ensaio, quando as cargas são mais elevadas. Finalmente, talvez o comportamento seja próprio do material constituído de partículas muito pesadas em relação às dos solos que habitualmente se ensaia.

7.2. Sugestões

Com base em experiência adquirida no presente trabalho, sugere-se para a continuação desta linha de pesquisa os seguintes pontos:

Quanto ao equipamento desenvolvido, automatize a aquisição de dados durante a realização dos ensaios. Colocando-se um transdutor de pressão na base da célula para medir a tensão total aplicada e substituindo-se o deflectômetro mecânico por um elétrico, é possível ligar a instrumentação ao sistema de aquisição de dados recentemente adquiridos para o Laboratório de Geotecnia da UFV e, desta forma, facilitar a realização e o acompanhamento dos ensaios (por exemplo, a velocidade instantânea poderá ser medida com facilidade).

No tocante à análise dos ensaios, procure ajustar os dados, evitando oscilações entre leituras consecutivas, antes de se usar o procedimento proposto por ZNIDARCIC et al. (1986). Desta forma talvez se consiga obter, consistentemente para todos os pontos de todos os ensaios, soluções numéricas da equação que calcula o intervalo de tempo adimensional.

Com relação ao material utilizado, realize ensaios com materiais menos pesados para verificar se a poro-pressão continua a cair no final do ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOSHI, H., YOSHIKUNI, H., MARUYAMA, S. Constant loading rate consolidation test. **Soils and Foundations**, v.10, n.1, p.43-56, 1970.

ABRÃO, P.C. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, 1, 1987, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: s.n., 1987. v.1, p.1-9.

ABRÃO, P.C. Sedimentação, drenagem e compressibilidade de rejeitos em testes de grandes dimensões. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, 1, 1987, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: s.n., 1987. v.1, p.23-38.

ALMEIDA, M.S.S. Ensaio especiais de adensamento. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: s.n., 1988. v.1, p.1-27.

ALVES, M.C.M. **Comportamento de sedimentação e adensamento de uma lama vermelha**. Rio de Janeiro: DEC,PUC-Rio, 1992. 213p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1992.

ALVES, M.C.M., ESPERANÇA, P.T.T. Uma discussão sobre o uso das descrições Euleriana e Lagrangeana na teoria do adensamento. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 1995, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: s.n., v.1, 1995. p.37-43.

ARMOUR Jr., D.W., DRNEVICH, V.P. Improved techniques for the constant-rate-of-strain consolidation test. In: YONG, R.N., TOWNSEND, F.C. (Eds.). **Consolidation of soils: Testing and evaluation**, ASTM STP 892. Philadelphia, PA: ASTM, 1986. p.170-183.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização** - método de ensaio. Rio de Janeiro: 1983. 11p. (NBR6457).

_____. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica** - método de ensaio. Rio de Janeiro: 1982. 2p. (NBR6508).

_____. **Análise granulométrica de solos** - método de ensaio. Rio de Janeiro: 1982. 16p. (NBR7181).

_____. **Solo - determinação do limite de liquidez** - método de ensaio. Rio de Janeiro: 1982. 7p. (NBR6459).

_____. **Solo - determinação do limite de plasticidade e do índice de plasticidade** - método de ensaio. Rio de Janeiro: 1982. 3p. (NBR7180).

_____. **Solo - ensaio de adensamento unidimensional.** Rio de Janeiro: 1990. 13p. (MB 3336).

AZEVEDO, R.F., SADO, J.S. Análise uni-dimensional do enchimento de reservatório de barragens de rejeito através de uma teoria de adensamento com grandes deformações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DE SOLOS E FUNDAÇÕES, 9, 1990, Salvador. **Anais...** Salvador: s.n., 1990. p.71-78.

BARBOSA, M.A.S. **Programa para o cálculo do ensaio oedométrico tipo CRD através da teoria de adensamento com grandes deformações.** Relatório PIBIC. Viçosa: UFV, 1996.

BARBOSA, P.S.A., ALMEIDA, M.S.S., SILLS, G.C. Ensaio de adensamento de fluxo restringido na argila de sarapuí. **Solos e Rochas**, São Paulo, v.16, n. 4, p.305-312, 1993.

BUENO, B.S., VILAR, O.M. **Mecânica dos solos.** Viçosa: UFV, 1980. 131p.

CAMPOS, T.M.P., VILLAR, L.F., AZEVEDO, R.F., GUIMARÃES FILHO, J.L. Consolidation analysis of a tailings reservoir. In: CONGRESSO PANAMERICANO, 9, 1991, Santiago. **Anais...** Santiago, Chile: s.n., 1991. p. 1021-1033.

CARVALHO, S.R.L. **Ensaio de adensamento edométrico com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo na argila do Sarapuí.** Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 1989. 224p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1989.

CARVALHO, S.R.L., ALMEIDA, M.S.S., MARTINS, I.S.M. Ensaio de adensamento com velocidade controlada: proposta de um método para definição da velocidade. **Solos e Rochas**, São Paulo, v.16, n. 3, p.185-196, 1993.

CRAWFORD, C.B. State of the art: evaluation and interpretation of soil consolidation tests. In: YONG, R.N., TOWNSEND, F.C. (Eds.) **Consolidaton of soils: Testing and evaluation**, ASTM STP 892. Philadelphia, PA: ASTM, 1986. p.71-103.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de dijon**. Paris, France: Dalmont, 1856.

GERSEVANOV, N.M. **The fundamentals of soil mass dynamics**, (in Russian), Gosstroyizdat, Leningrad, U.S.S.R.: 1934.

GIBSON, R.E., ENGLAND, G.L., HUSSEY, M.J.L. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I. Finite non linear consolidation of thin homogeneous layers. **Geotechnique**, v.17, n.3, p.261-273, 1967.

GOBARA, W., PINTO, C.S. A teoria do adensamento de Mikasa. **Solos e Rochas**, São Paulo, v.16, n.1, p.3-14, 1993.

GORMAN, C.T., HOPKINS, T.C., DEEN, R.C., DRNEVICH, V.P. Costant rate of strain and controlled gradient testing. **Geotechnical Testing Journal**, v.1, n.1, p.3-15, 1978.

GUIMARÃES FILHO, J.L. **Desenvolvimento de um edômetro para ensaios com taxa constante de deslocamento**: aplicação a rejeitos industriais depositados sob forma de lama. Rio de Janeiro: DEC, PUC-Rio, 1990. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1990.

GUMIERI, A.G. **Estudo do adensamento e liquefação sob carregamento estático de dois rejeitos de mineração**. Viçosa: DEC, UFV, 1995. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil.) - Universidade Federal de Viçosa, 1995.

- IMAI, G. Development of a new consolidation test procedure using seepage force. **Soils and Foundations**, v.19, n.3, p.45-60, 1979.
- JANBU, N., TOKHEIM, O., SENNESET, K. Consolidation tests with continuous loading. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION, 10, 1981, Estocolmo, Suécia. **Proceedings...** Estocolmo: s.n., 1981. v.1, p.645-654.
- KYNCH, G.J. A theory of sedimentation. **Transactions of the Faraday Society**, v.48, p.166-176, 1952.
- LEE, K. Consolidation with constant rate of deformation. **Geotechnique**, v.31, n.2, p.215-229, 1981.
- LOWE, J., JONAS, E., OBRICIAN, V. Controlled gradient consolidation test. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v.95, SM1, p.77-97, 1969.
- MARTINEZ A., R.E., BLOOMQUIST, D., TOWNSEND, F.C. Automated large deformation consolidometer. In: PCSMFE, 8, 1987, Cartagena. **Proceedings...** Cartagena, s.n., 1987. p.65-76.
- MIKASA, M. **The consolidation of soft-clay** - A new consolidation theory and its application. Tokyo: Kajima Shuppankai, 1963.
- MONTE, J. L., KRIZEK, R.J. One-dimensional mathematical model for large-strain consolidation. **Geotechnique**, v.26, n.3, p.495-510, 1976.
- OLSON, R.E. State of the art: Consolidation testing. In: YONG, R.N., TOWNSEND, F.C. (Eds.) **Consolidation of soils: Testing and evaluation**, ASTM STP 892. Philadelphia, PA: ASTM, 1986. p.7-70.

OZISIK, M.N. **Boundary value problems of heat conduction**. Pennsylvania, PA: International Textbook Company, 1968. 505p.

PANE, V., SCHIFFMAN, R.L. A note on sedimentation and consolidation. **Geotechnique**, v.35, n. 3, p.69-72, 1985.

PENNINGTON, R.H. **Introductory computer methods and numerical analysis**. New York, USA: The Macmillan Company, 1965. 452p.

ROWE, P.W., BARDEN, L. A new consolidation cell. **Geotechnique**, v.16, p.162-170, 1966.

SCHIFFMAN, R.L., PANE, V., GIBSON, R.E. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: IV. An overview of non linear finite strain sedimentation and consolidation. In: YONG R.N., TOWNSEND, F.C. (Eds.) **Sedimentation: consolidation models**. S.l.: ASCE, 1984. p.1-29.

SCHIFFMAN, R.L. **Short course on the consolidation of soft clays**. Rio de Janeiro: PUC, 1987. paginação irreg. (Coletânea de artigos CA 01/87).

SILLS, G.C., HOARE, S.D.L., BAKER, N. An experimental assessment of the restricted flow consolidation test. In: YONG, R.N., TOWNSEND, F.C. (Eds.) **Consolidation of soils: testing and evaluation**. ASTMSTP892. Philadelphia, PA: ASTM, 1986. p.203-216.

SMITH, R.E., WAHLS, H.E. Consolidation under constant rates of strain. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v.95, SM2, p.519-539, 1969.

TERRA PINTO, W. **Teoria uni-dimensional do adensamento com grandes deformações**. Rio de Janeiro: DEC,PUC-Rio, 1988. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1988.

TERZAGHI, C. Principles of final soil classification. **Public Roads**, v.8, n.3, p.41-53, 1927.

TERZAGHI, K., FRÖHLICH, O.K. **Theorie der setzung von tonschichten:** eine einfuhrung in die analytische tonmechanik. Leipzig, Germany: F. Deuticke, 1936.

UMEHARA, Y., ZEN, K. Constant rate of strain consolidation for very soft clayey soils. **Soils and Foundations**, v.20, n.2, p.79-95, 1980.

VILLAR, L.F.S. **Análise do comportamento de resíduos industriais de bauxita:** desenvolvimento de facilidades experimentais de campo e laboratório. Rio de Janeiro: DEC, PUC-Rio, 1990. 225p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1990.

VON FAY, K.F., COTTON, C.E. Constant-rate-of-loading (CRL) consolidation test. In: Yong, R.N., Townsend, F.C. (Eds.) **Consolidation of soils:** Testing and evaluation, ASTM STP 892. Philadelphia, PA: ASTM, 1986. p. 236-256.

WISSA, A.E.Z., CHRISTIAN, J.T., DAVIS, E.H., HEIBERG, S. Consolidation at constant rate of strain. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v.97, SM10, p.1393-1413, 1971.

ZNIDARCIC, D., SCHIFFMAN, R.L. Finite strain consolidation: test conditions. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v.107, GT5, p. 684-688, 1981.

ZNIDARCIC, D., SCHIFFMAN, R.L., PANE, V., CROCE, P.; KO, H.Y., OLSEN H.W. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: part V, constant rate of deformation testing and analysis. **Geotechnique**, v.36, n.2, p.227-237, 1986.