

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. Características de argilas diversas

Diversos estudos de campo e de laboratório, com o objetivo de determinar características de argilas moles, têm sido reportados na literatura geotécnica.

Sayão (1980) determinou, em laboratório, parâmetros que representam as características geotécnicas do material argiloso mole da Baixada Fluminense, na região da escavação experimental realizada no campo experimental de Sarapuí. Foram obtidos pelos ensaios de caracterização os valores médios para o limite de liquidez (LL = 98%), limite de plasticidade (LP = 49%), massa específica real dos grãos ( $G_s = 26,4 \text{ kN/m}^3$ ) e a granulometria por sedimentação ( $\% < 2 \mu\text{m} = 85\%$ ), bem como a umidade natural ( $w_{\text{nat}} = 140,5\%$ ) durante a realização dos ensaios triaxiais e oedométricos.

O índice de compressão ( $C_c$ ) variou na faixa de 1,41 a 2,56. Os demais índices, de expansão ( $C_s$ ) e recompressão ( $C_r$ ), indicaram uma leve tendência de redução com a profundidade, com valores entre 0,2 e 0,5. A partir da obtenção do OCR, inferior a 1,4, chegou-se à constatação de que se tratava de um material levemente pré-adensado.

Para a obtenção dos valores dos coeficientes de adensamento ( $C_v$ ), o autor utilizou os métodos empíricos de Taylor (1948) e Casagrande (1936), obtendo valores respectivamente iguais a  $5,9$  e  $3,0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (no trecho de recompressão),  $1,0$  e  $0,6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (na compressão virgem) e  $5,6$  e  $3,1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (na expansão). Assim, constatou-se que os valores de  $C_v$  obtidos nas fases de expansão e recompressão são cerca de 5 a 6 vezes maiores que os valores referentes à compressão, em ambos os métodos.

Foram também realizados ensaios triaxiais, sendo as amostras ensaiadas sob confinamento correspondente às tensões efetivas de campo. A partir destes ensaios, foram obtidos os parâmetros de resistência  $c' = 3 \text{ kPa}$  e  $\Phi' = 24^\circ$ . Durante a fase de adensamento hidrostático dos ensaios triaxiais, foi estimado um valor médio de  $C_v = 4,7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ , similar aos valores obtidos para os ensaios convencionais de adensamento unidimensional.

Ortigão (1980), por sua vez, estudou o aterro experimental I, também localizado no campo experimental de Sarapuí, na Baixada Fluminense. A pesquisa envolveu ensaios de campo e laboratório para a obtenção de parâmetros não-drenados de tensão-deformação-resistência da argila.

Foram obtidos, a partir da campanha experimental de laboratório, valores para o limite de liquidez (LL) variando no intervalo de 86 a 161%, limite de plasticidade (LP) variando de 33 a 73%, granulometria por sedimentação ( $\% < 2\mu\text{m} = 55\%$ ), e teor de umidade natural ( $w_{\text{nat}}$ ) entre 106 e 172%.

Os índices de compressão virgem ( $C_c$ ) variaram entre 1,65 a 2,43 e os de recompressão ( $C_r$ ) variaram entre 0,25 a 0,58. Os valores de OCR apresentaram uma tendência de redução com o aumento da profundidade, com valores variando de 5,0 a 2,5 em profundidades inferiores a 2,5 m. Para maiores profundidades, o valor de OCR reduzia-se até atingir valores próximos a 1,0.

Também foram reportados ensaios triaxiais não drenados por Ortigão (1980), com os parâmetros de resistência  $c' = 0$  e  $\Phi' = 25^\circ$ , bem como os valores de resistência não-drenada ( $S_u$ ) variando entre 3,5 e 12,6 kPa.

Ribeiro (1992) determinou, a partir dos ensaios de laboratório, as características geotécnicas de um depósito de argila mole no litoral de Sergipe. Os ensaios de caracterização do material revelaram que este possui uma plasticidade média ( $IP = 38\%$ ) e o limite de liquidez próximo ao teor de umidade natural. O depósito fora classificado como argilo-siltoso, apresentando fragmentos de conchas e um teor de matéria orgânica relativamente baixo (cerca de 2%). O índice de compressão ( $C_c$ ) apresentou um valor da ordem de 0,92 e os valores de OCR observados foram, em geral, inferiores a 1,5, assim considerando o depósito como normalmente adensado.

Ribeiro (1992) também realizou ensaios triaxiais CIU e, a partir destes ensaios, obteve parâmetros de resistência  $c'$  aproximadamente nulo e  $\Phi' = 29^\circ$ .

Garcés (1995) determinou, em laboratório, as características geotécnicas de solos moles situados em localidades denominadas de “Vigário Geral” e “subestação de Sarapuí”, ambos locais de depósitos da Baixada Fluminense. Para a argila de Vigário Geral foram obtidos, pelos ensaios de caracterização, os valores de limite de liquidez entre 55,5 a 192,0%, limite de plasticidade entre 39,8 e 122,0%, massa específica real dos grãos entre 24,0 a 26,6  $\text{kN/m}^3$ , e umidade natural entre 48,5 e 149,2%. Já para a argila da subestação de Sarapuí, foram obtidos limite de liquidez variando de 39,4 a 86,7%, limite de plasticidade de 12,4 a 48,6%, massa específica real dos grãos entre 25,2 e 26,2  $\text{kN/m}^3$ , e teor de umidade natural de 35,8 a 84,4%.

Garcés (1995) determinou também, para ambos os locais, os índices de compressão ( $C_c$ ), de expansão ( $C_s$ ) e recompressão ( $C_r$ ) a partir de ensaios de adensamento com carregamento incremental (SIC) e com velocidade constante de deformação (CRS), cujos resultados encontram-se reproduzidos na Tabela 1, juntamente com as características iniciais dos corpos de prova.

Tabela 1 – Características iniciais dos corpos de prova e resultados dos ensaios de adensamento

Local	“Vigário Geral”		“Subestação de Sarapuí”	
	SIC	CRS	SIC	CRS
$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	12,5 a 16,7	12,6 a 17,0	14,9 a 18,4	15,9 a 18,0
$e_0$	1,37 a 3,78	1,33 a 3,75	0,94 a 2,13	0,98 a 1,58
S (%)	92 a 94	90 a 97	100	94 a 100
$\sigma'_{vm}$ (kPa)	48 a 85	70 a 185	24 a 48	35 a 110
OCR	1,0 a 1,8	1,6 a 3,6	1,0 a 2,0	1,0 a 3,6
$C_c$	0,37 a 1,63	0,28 a 2,54	0,25 a 0,75	0,30 a 0,72
$C_s$	0,09 a 0,24	0,04 a 0,30	0,05 a 0,14	0,03 a 0,05
$C_r$	0,06 a 0,23	0,09 a 0,30	0,07 a 0,34	0,04 a 0,09

Os valores do coeficiente de adensamento ( $C_v$ ) foram calculados a partir dos resultados dos ensaios de laboratório através dos métodos de Casagrande (1936) e Taylor (1948) para os trechos de recompressão e de compressão virgem, obtendo-se valores de  $5$  a  $50 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s e de  $1$  a  $10 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s, respectivamente.

Baptista (1998) fez ensaios de campo e laboratório na argila mole da Enseada de Cabrito, em Salvador, Bahia. A campanha envolveu ensaios para a determinação das propriedades geotécnicas do depósito marinho da região. Foram obtidos, no laboratório, os valores médios para o limite de liquidez ( $LL = 90\%$ ), índice de plasticidade ( $IP = 50\%$ ) e teor de umidade de  $81\%$ .

O índice de compressão ( $C_c$ ) apresentou valores médios de  $0,84$  e  $0,94$  para os ensaios SIC e CRS, respectivamente, aferindo que o material possui uma compressibilidade elevada. Foram encontrados valores para o coeficiente de adensamento ( $C_v$ ) a partir dos ensaios de laboratório da ordem de  $3 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s, enquanto os ensaios de campo permitiram uma estimativa de  $C_v$  da ordem de  $1 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s.

Também foram realizados ensaios triaxiais CIU e, a partir destes ensaios, obtidos os parâmetros de resistência  $c' = 4$  kPa e  $\Phi' = 29^\circ$ . A partir de ensaios de

palheta, foi constatado que o valor da resistência não-drenada ( $S_u$ ) tende a aumentar com a profundidade, variando entre 6 e 17 kPa.

## **2.2. Ensaio de adensamento**

Este ensaio foi proposto, inicialmente, por Terzaghi (1924) a fim de reproduzir as condições da teoria clássica do adensamento, que se aplica para carregamentos sobre solos homogêneos saturados sob condições unidimensionais de deformações e fluxo.

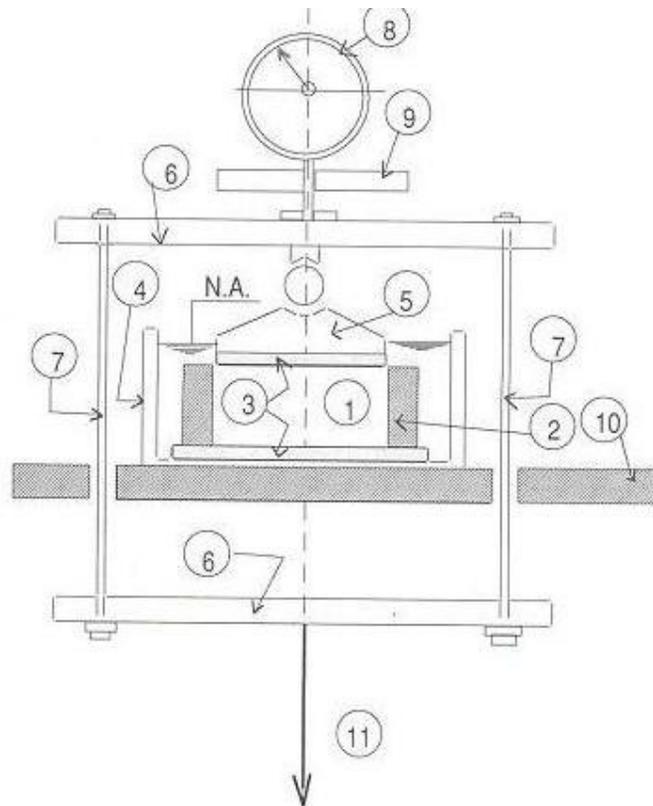
### **2.2.1. Ensaio de adensamento convencional (SIC)**

Este ensaio consiste na aplicação, no corpo de prova, de carregamentos em estágios. São observadas as deformações ao longo do tempo. O ensaio é composto de vários estágios de carregamento e descarregamento, sendo que cada estágio possui duração, geralmente, de 24 horas.

A partir de um ensaio de adensamento em laboratório, são obtidos a tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ), os índices de compressão ( $C_c$ ,  $C_r$  e  $C_s$ ), o coeficiente de compressão secundária ( $C_\alpha$ ), o coeficiente de adensamento ( $C_v$ ), o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) e o coeficiente de variação volumétrica ( $m_v$ ).

O equipamento para realização deste ensaio está ilustrado na Figura 1. O corpo de prova é moldado em um anel cilíndrico, que o confina, não permitindo deformações horizontais do mesmo. No corpo de prova é aplicada instantaneamente uma carga vertical. Durante o ensaio são medidos os deslocamentos verticais para cada estágio de carregamento.

Bjerrum (1973) e Sällfodrs (1975) realizaram ensaios de adensamento convencional com incrementos de carga iguais a 10 ou 20 kPa, com duração de 24h, e obtiveram uma curva de compressão bem definida; contudo os valores de  $C_v$  não foram bem definidos pois as curvas de deformação específica vertical em função do tempo não foram semelhantes às de Terzaghi.



- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| 1. Corpo de prova cilíndrico             | 7. Tirantes                         |
| 2. Anel metálico                         | 8. Extensômetros                    |
| 3. Pedra porosa                          | 9. Suporte fixo para o extensômetro |
| 4. Recipiente com água                   | 10. Mesa de apoio                   |
| 5. Placa rígida para aplicação de cargas | 11. Carga axial                     |
| 6. Vigas de reação                       |                                     |

Figura 1 – Equipamento para realização de ensaio de adensamento convencional.

Também fora estudada a influência da deformabilidade do equipamento nos resultados dos ensaios oedométricos. Kupper (1983) relata que, devido à configuração do equipamento, a deformação vertical medida em um ensaio corresponde à deformação do conjunto “solo + papel filtro + pedra porosa + equipamento”; contudo, para solos de alta compressibilidade, as parcelas de deformações do papel filtro, da pedra porosa e do equipamento são consideradas desprezíveis.

### ***Características do ensaio de adensamento convencional***

Entre as vantagens do ensaio de adensamento convencional, podem-se citar as seguintes:

- A utilização do equipamento é bastante simples, não exigindo um técnico altamente especializado para o seu manuseio.
- Há procedimentos práticos bem estabelecidos, tornando mais fácil a execução do ensaio e o estabelecimento da interpretação dos dados.

O ensaio, porém, apresenta as seguintes desvantagens:

- O método convencional exige um tempo excessivo de ensaio, usualmente da ordem de 7 a 8 dias, mas este tempo pode aumentar, consideravelmente, quando ocorrem ciclos de carga e descarga. Logo, o ensaio torna-se dispendioso.
- Os pontos da curva tensão vs deformação são espaçados, dificultando, para certos tipos de solos, uma definição precisa da tensão de pré-adensamento  $\sigma'_{vm}$ . A utilização de uma razão de incremento de carga igual a 0,5, ao invés de 1,0, melhora a definição de  $\sigma'_{vm}$ , porém duplica o tempo total do ensaio. (Almeida, 1988).
- As deformações provenientes do adensamento secundário são variáveis nos diferentes estágios de carregamento, e podem afetar a estimativa da tensão de pré-adensamento.
- Ao ser executado com uma razão de incremento de carga unitária, o corpo de prova é submetido a carregamentos instantâneos e crescentes durante o transcorrer do ensaio, o que induz altos gradientes hidráulicos e uma distribuição acentuadamente não uniforme de poropressões.

Segundo Head (1985), para a correta execução do ensaio, alguns requisitos especiais são essenciais, tais como a constante atenção e análise manual dos dados, quando um sistema automático de aquisição de dados não é utilizado.

### 2.2.2.

#### Ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS)

Este ensaio foi desenvolvido com o objetivo de se determinar o valor da tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) com mais rapidez e precisão; além de contornar duas limitações básicas do ensaio convencional de adensamento:

- o número reduzido de dados para definir a curva tensão-deformação no ensaio convencional.
- o tempo necessário para a realização de um ensaio convencional em argilas moles que é, em geral, da ordem de uma semana.

A execução do ensaio CRS requer que apenas uma das faces da amostra seja drenante (geralmente o topo). Na face não drenada (geralmente a base) são feitas as leituras da poropressão gerada durante a aplicação do carregamento. Com isso, pode-se estimar, em qualquer instante, o valor médio da tensão efetiva no corpo de prova.

Considera-se, neste ensaio, que a distribuição da pressão é parabólica ao longo da altura do corpo de prova. Portanto, o valor de  $u$  a ser adotado para o cálculo da tensão efetiva média ( $\sigma'_m$ ) deve ser igual a  $\frac{2u_b}{3}$ , onde  $u_b$  é o valor da poropressão registrada na base do corpo de prova. A partir disto, o valor da tensão efetiva média pode ser obtido como  $\sigma'_m = \sigma_v - \frac{2u_b}{3}$ .

O maior problema deste tipo de ensaio é a determinação da velocidade de deformação a ser utilizada para a realização do mesmo. Esta velocidade deve possuir, como limite superior, um valor de  $u_b$  que mantenha aceitável a consideração de uniformidade das poropressões e das tensões efetivas ao longo da altura do corpo de prova. Como limite inferior, a velocidade tem que ser tal que se possa garantir um valor de  $u_b$  confiável para a estimativa de  $C_v$ .

A aplicação do carregamento é feita por uma prensa similar 'a prensa utilizada em ensaios triaxiais com deformação controlada, conforme mostra a Figura 2. Mantém-se, assim, o conceito do ensaio, que é impor ao corpo de prova uma taxa de deformação constante ao longo do tempo.

Durante o ensaio são medidos os valores da tensão total aplicada no topo ( $\sigma_v$ ), a poropressão na base ( $u_b$ ) e a variação da altura ( $\Delta h$ ) do corpo de prova.

Hamilton & Crawford (1959) pesquisaram a influência da velocidade de deformação, concluindo que os parâmetros de compressibilidade, para uma

dada estrutura de solo, variam consideravelmente com o tempo de execução do ensaio.

Smith & Wahls (1969) sugeriram que o valor da razão  $u_b / \sigma_v$  deve ser sempre inferior a 50%, para garantir a uniformidade de tensão vertical efetiva ao longo do corpo de prova.

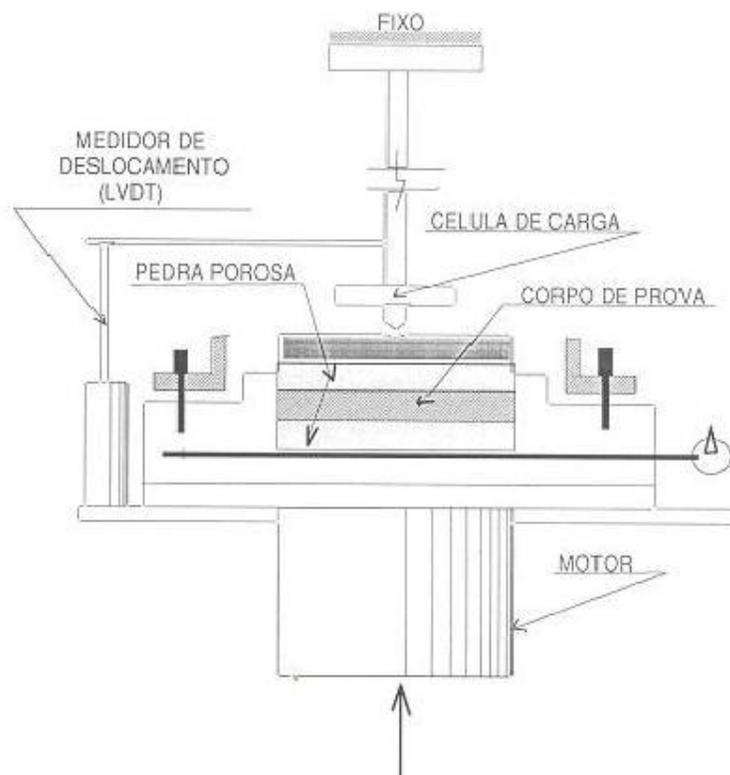


Figura 2 – Equipamento de ensaio de adensamento CRS .

Wissa et al. (1971) realizaram ensaios CRS com valores de velocidade de deformação variando entre 0,6% / hora e 2,9% / hora, com resultados similares aos obtidos em ensaios SIC, para amostras reconstituídas da argila azul de Boston. Estes autores sugerem que a relação de  $u_b / \sigma_v$  deve permanecer entre 2% e 5%, a fim de garantir uma distribuição parabólica de poro-pressão uniforme no corpo de prova.

Vaid et al. (1979) investigaram os efeitos da velocidade de deformação na compressibilidade de uma argila sensível da região leste do Canadá, utilizando velocidades de deformação entre 0,1 e 4,1 % / hora. Em comparação com os resultados obtidos em ensaios convencionais, os autores observaram que a compressibilidade diminuiu com o aumento da velocidade de deformação, o que pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 3.

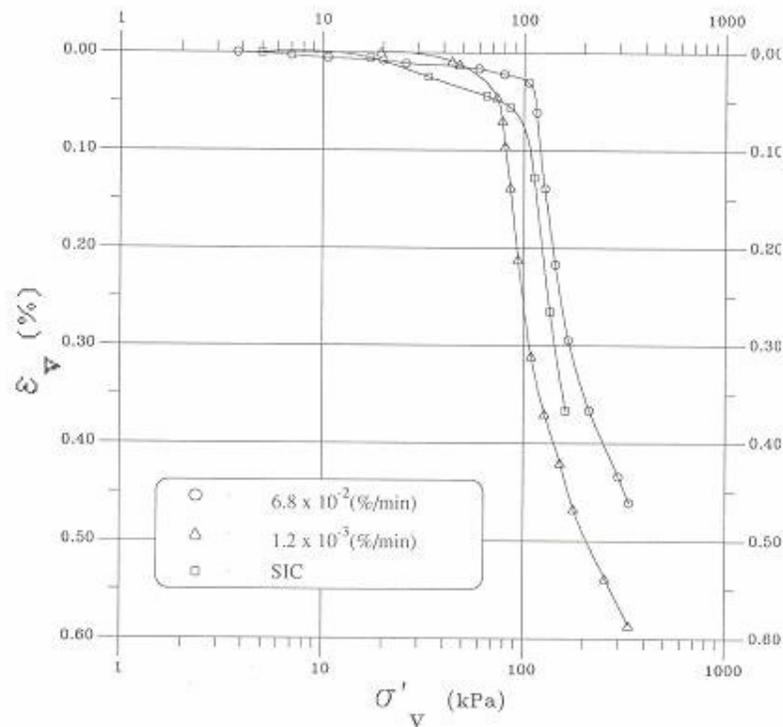


Figura 3 - Ensaios de adensamento unidimensional em argila sensível (Vaid et al. 1979)

Carvalho (1989) realizou uma série de ensaios na argila mole de Sarapuí, na Baixada Fluminense, com a finalidade de desenvolver uma nova metodologia para a execução do ensaio de adensamento com taxa constante de deformação CRS. Foi verificado que, apesar de obter uma razão máxima de  $u_b/\sigma_v$  da ordem de 30%, os resultados não foram afetados ao serem comparados com os valores obtidos, para o mesmo material, no ensaio convencional de carregamento.

A investigação de Ribeiro (1992) obedeceu às recomendações propostas por Wissa et al (1971), com uma relação de  $u_b/\sigma_v$  da ordem de 5%. Ao comparar os resultados com os obtidos nos ensaios de carregamento incremental verificou valores similares para o  $C_v$ . Também fora verificado um aumento da tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) com o aumento da velocidade.

A maior dificuldade atribuída à realização deste ensaio é a determinação da taxa de aplicação da tensão vertical em relação ao tempo, por conseguinte a velocidade de realização do ensaio.

### **Determinação da velocidade do ensaio CRS**

Para determinar a velocidade adequada a ser utilizada no ensaio, devem-se levar em consideração os seus objetivos, além das limitações teóricas para a análise dos resultados. Portanto, a velocidade deve atingir um determinado valor no qual a poro pressão gerada na base atinja um valor mínimo para a obtenção de bons resultados de coeficientes de adensamento, definido pela eficácia das leituras do transdutor que mede as poropressões, e também um valor máximo no qual a relação tensão-deformação atinja um limite sem que os resultados possam ser questionáveis.

Há uma certa diversidade de critérios para a seleção da velocidade no ensaio CRS encontrados na literatura, como os propostos por: Smith & Wahls (1969), Wissa et al. (1971), Gorman et al. (1978) e Armour & Drnevich (1986).

Verifica-se que a maioria deles prescreve diretamente a velocidade com a razão  $u_b/\sigma_v$ , entre a poro-pressão e a tensão vertical total, ou então associam essas duas condições.

### **2.3. Parâmetros de compressibilidade**

No estudo das deformações, é necessário o conhecimento dos parâmetros de compressibilidade, a fim de se realizar a previsão do comportamento do solo sujeito à sobrecarga. Alguns parâmetros importantes são apresentados a seguir:

- Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica:  $m_v$ ;
- Módulo Oedométrico:  $D = 1/m_v$ ;
- Módulo Volumétrico:  $B_0 = \sigma'_c / \epsilon_v$ ;
- Índice de Compressão:  $C_c$ ;
- Índice de Recompressão:  $C_r$ ;
- Índice de Descompressão ou Expansão:  $C_s$ ;
- Coeficiente de Adensamento Secundário:  $C_\alpha$ .

O coeficiente de compressibilidade volumétrica é uma característica do esqueleto sólido do material, sendo obtido através da curva  $\sigma_v \times \epsilon_v$  pela expressão:  $m_v = \Delta\epsilon_v / \Delta\sigma_v$ .

Os módulos oedométrico e volumétrico são determinados a partir da variação de volume do material. O primeiro é obtido através do ensaio de adensamento cujas deformações são estritamente verticais, como nos ensaios

de adensamento SIC e CRS. Já o módulo volumétrico é obtido em ensaio de adensamento cujas deformações verticais e horizontais são permitidas, como no ensaio de adensamento hidrostático. Este é obtido a partir da inclinação da curva “ $\sigma \times \varepsilon$ ”

$C_c$ ,  $C_r$  e  $C_s$  são parâmetros referentes ao adensamento primário, e  $C_\alpha$  ao adensamento secundário, o qual é atribuído à deformação visco-elástica do esqueleto sólido sob carregamento constante ao longo do tempo.

Os índices de compressão, recompressão e descompressão são as declividades da curva “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)”, cada qual em um trecho deferente da curva. O índice de compressão está associado diretamente com a magnitude dos recalques.

## 2.4. Parâmetros de Adensamento

O processo de adensamento consiste na expulsão da água existente no interior dos vazios do solo, a partir da aplicação de uma sobrecarga. A velocidade da água que flui é relacionada com os parâmetros de adensamento do solo. Os principais são a permeabilidade ( $k$ ) e o coeficiente de adensamento do solo ( $C_v$ ).

Estes parâmetros do solo estão intimamente ligados com a capacidade do solo em dissipar a poropressão gerada durante a aplicação da sobrecarga. A permeabilidade é a característica do solo de facilitar o fluxo da água nos poros, enquanto o coeficiente de adensamento está relacionado com a velocidade de adensamento do material. Da teoria do adensamento de Terzaghi, observa-se, a partir da Equação 2.1, que estes parâmetros são diretamente proporcionais.

$$C_v = \frac{k \cdot (1 + e)}{a_v \cdot \gamma_0} \quad (2.1)$$

onde:  $\gamma_0$ : peso específico da água;  $a_v$ : coeficiente de compressibilidade

### 2.4.1. Métodos para obtenção do Coeficiente de Adensamento

A determinação do valor do coeficiente de adensamento se faz necessária para a estimativa da velocidade de dissipação do excesso de poro-pressão. É importante que o valor traduza adequadamente os efeitos do tipo de solicitação e das condições de drenagem.

Para o ensaio de adensamento convencional (SIC), Sayão (1980) destaca três procedimentos básicos para a determinação de  $C_v$ :

- a) em ensaios de laboratório, através da dissipação das poropressões ou através da evolução das deformações do corpo de prova.
- b) Indiretamente, através da expressão  $c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w}$ , onde  $m_v$  é obtido indiretamente através de ensaios de laboratório e  $k$  é determinado em ensaios de campo.
- c) Em uma obra experimental (aterro ou escavação) através da dissipação das poropressões em um piezômetro ou da evolução das deformações sofridas por uma placa de recalque, o que seria, podemos assim dizer, o procedimento do item a) aplicado na prática.

Para os itens a e c, o valor de  $C_v$  pode ser calculado por métodos distintos. Alguns métodos reportados na literatura são descritos a seguir.

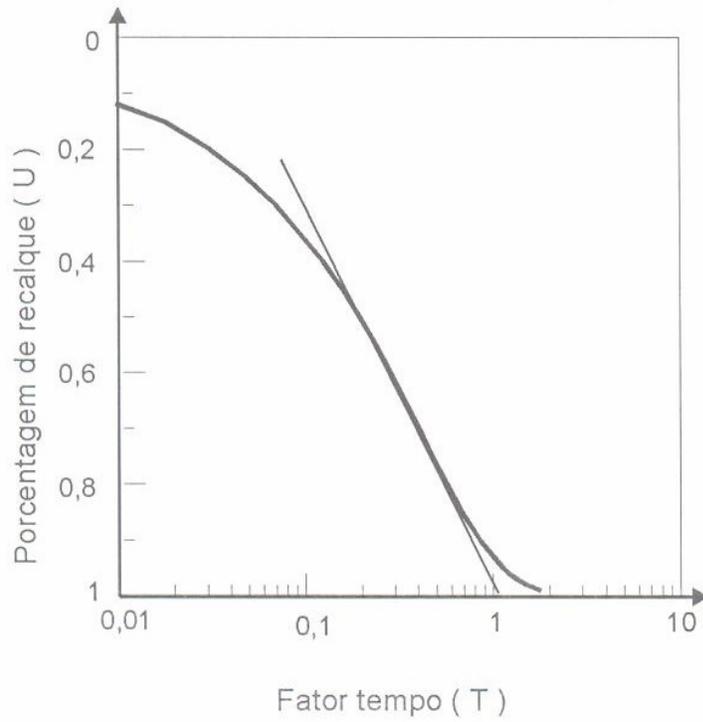
#### **a) Método de Casagrande (1936)**

O método desenvolvido por Casagrande (1936), é também conhecido como “método do logaritmo do tempo” ( $\log t$ ). É baseado no formato da curva porcentagem de adensamento ( $U$ ) *versus* o fator tempo ( $T$ ), em escala semi-logarítmica. Esta representação realça o trecho de adensamento primário, quando plotados os dados de ensaio em função do tempo, conforme mostrado na Figura 4 (a).

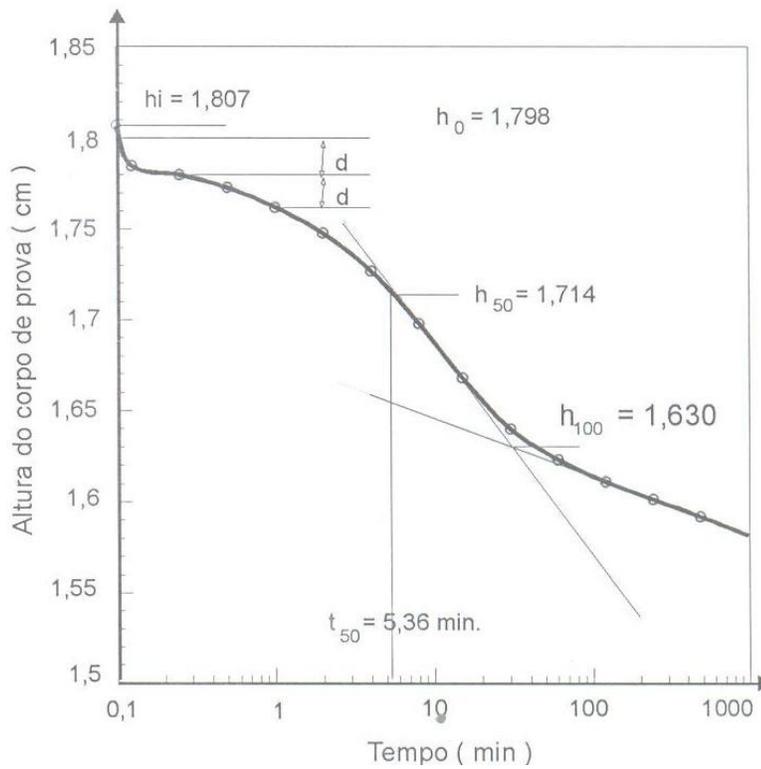
Para a determinação do coeficiente de adensamento é necessário que se determine, primeiramente, a altura correspondente ao final do adensamento primário. Esta é obtida pela ordenada da interseção da tangente do ponto de inflexão e o prolongamento do trecho reto da curva, como mostra a Figura 4 (b).

Obtida a altura final de adensamento, determina-se a altura equivalente a 50% da altura final. A abscissa deste ponto,  $t_{50}$ , é utilizada para o cálculo do coeficiente de adensamento (Equação 2.2).

$$C_v = \frac{0,197.H_d^2}{t_{50}} \quad (2.2)$$



(a)



(b)

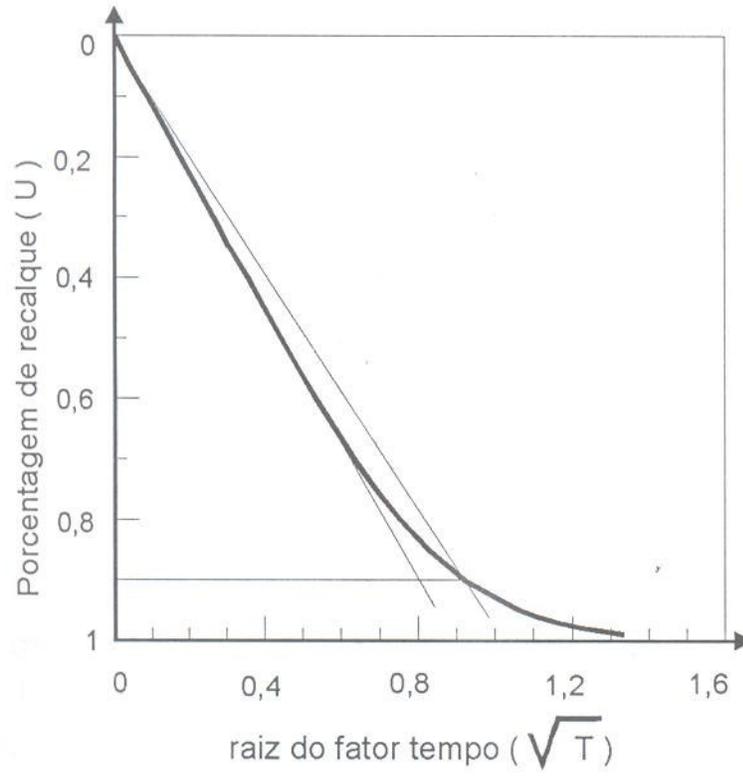
Figura 4 – Determinação do coeficiente de adensamento através do Método de Casagrande (1936).

**b) Método de Taylor (1942)**

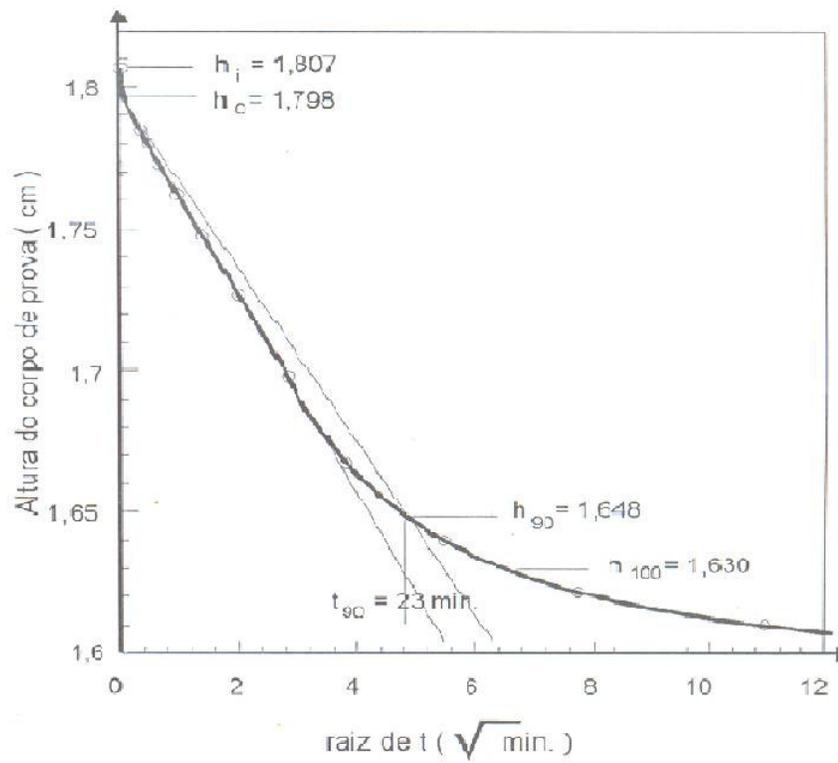
Desenvolvido por Taylor (1942), também conhecido como “método da raiz quadrada do tempo” ( $\sqrt{t}$ ), este método baseia-se no formato da curva da porcentagem de adensamento (U) *versus* a raiz quadrada do fator tempo (T). Esta representação realça o trecho inicial da curva, que se torna aproximadamente linear, como mostrado na Figura 5 a. Os dados do ensaio são plotados em função da raiz quadrada do tempo (Figura 5 b).

Do início do adensamento primário, traça-se uma reta auxiliar, com abscissas iguais a 1,15 vezes as abscissas do trecho reto inicial da curva do ensaio. A interseção desta reta auxiliar com o trecho não linear da curva do ensaio indica o ponto correspondente a 90% do adensamento. A partir deste ponto, ou seja, do tempo  $t_{90}$ , é determinado o coeficiente de adensamento (Equação 2.3).

$$C_v = \frac{0,848.H_d^2}{t_{90}} \quad (2.3)$$



(a)



(b)

Figura 5 – Determinação do coeficiente de adensamento através do Método de Taylor (1942)

### c) Método de Linearização de Deformação Finita

O método proposto por Smith (1967) é uma variação do método de Casagrande (1936) para a determinação do coeficiente de adensamento  $C_v$  através da linearização de deformação finita. Para a determinação de  $C_v$ , é necessário que os resultados do ensaio oedométrico sejam plotados para cada estágio, conforme indica a Figura 6. A curva típica ( $\varepsilon_v, x\sqrt{t}$ ) é inicialmente acentuada, seguindo-se um trecho aproximadamente horizontal. Para o trecho inicial, é obtida uma tangente e a intersecção desta com a reta horizontal do adensamento primário, determina o valor do  $t_s$ . O valor de  $C_v$  é estimado a partir de bases empíricas, pela Equação 2.4:

$$C_v = \frac{H_d^2 T_s}{t_s} \quad (2.4)$$

onde:  $H_d$  = altura de drenagem do corpo de prova e  $T_s = \pi / 4$ .

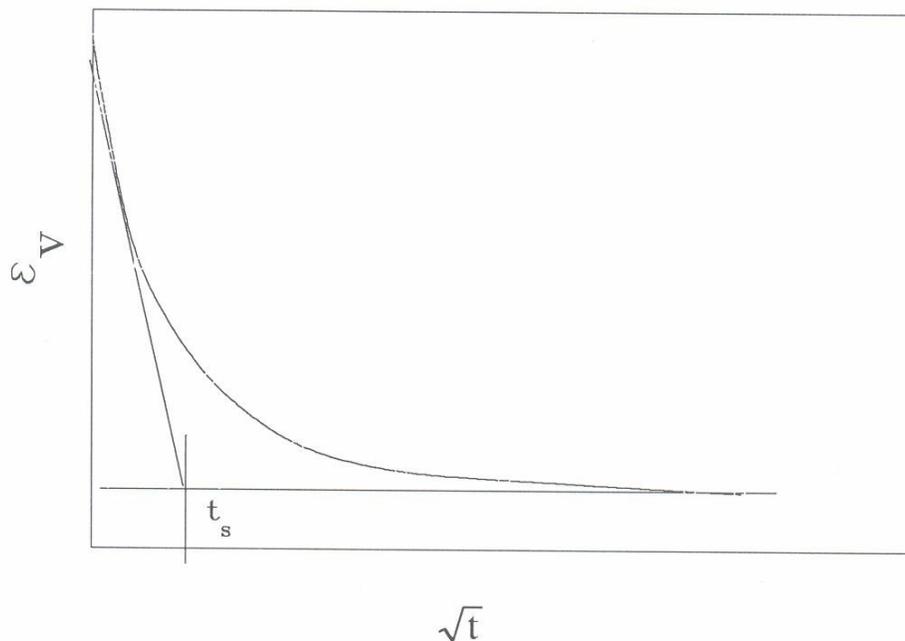


Figura 6 - Determinação de  $C_v$  através do Método de Linearização de Deformação Finita

**d) Método de Wissa et. al. (1971)**

Wissa et al. (1971) apresentam duas formulações para a obtenção do  $C_v$ , para ensaios de adensamento com carregamento contínuo (CRS), em função do tipo de comportamento do solo (linear ou não linear). As Equações 2.5 e 2.6, apresentadas a seguir, são as propostas por Wissa et al para o cálculo de  $C_v$ .

$$\begin{array}{l} \text{Comportamento} \\ \text{Linear} \end{array} \quad C_v = \frac{H^2}{2u_b} \cdot \left( \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta t} \right) \quad (2.5)$$

$$\begin{array}{l} \text{Comportamento} \\ \text{Não-Linear} \end{array} \quad C_v = - \frac{H^2 \cdot \log\left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right)}{2 \cdot \Delta t \cdot \log\left(1 - \frac{u_b}{\sigma_{v1}}\right)} \quad (2.6)$$

onde:  $H$  = altura do corpo de prova;  $u_b$  = poro-pressão na base,  $\Delta\sigma_v$  = variação de tensão total;  $\Delta t$  = intervalo de tempo;  $\sigma_{v1}$  = tensão total no início do intervalo  $\Delta t$ ;  $\sigma_{v2}$  = tensão total no tempo no final do intervalo  $\Delta t$ .

**d) Método de Ajuste Retangular Hiperbólico**

Sridharam & Pakash (1985) propuseram o método de ajuste retangular hiperbólico para o cálculo de  $C_v$ . Este possui a vantagem de utilizar todos os dados do ensaio oedométrico, diferentemente do método de Taylor que enfatiza somente as primeiras leituras do ensaio. Este método leva em consideração que o gráfico  $T / U$  vs  $T$  (onde  $T$  é o fator tempo teórica e  $U$  é o grau de adensamento) é uma hipérbole retangular, como mostrado na Figura 7.

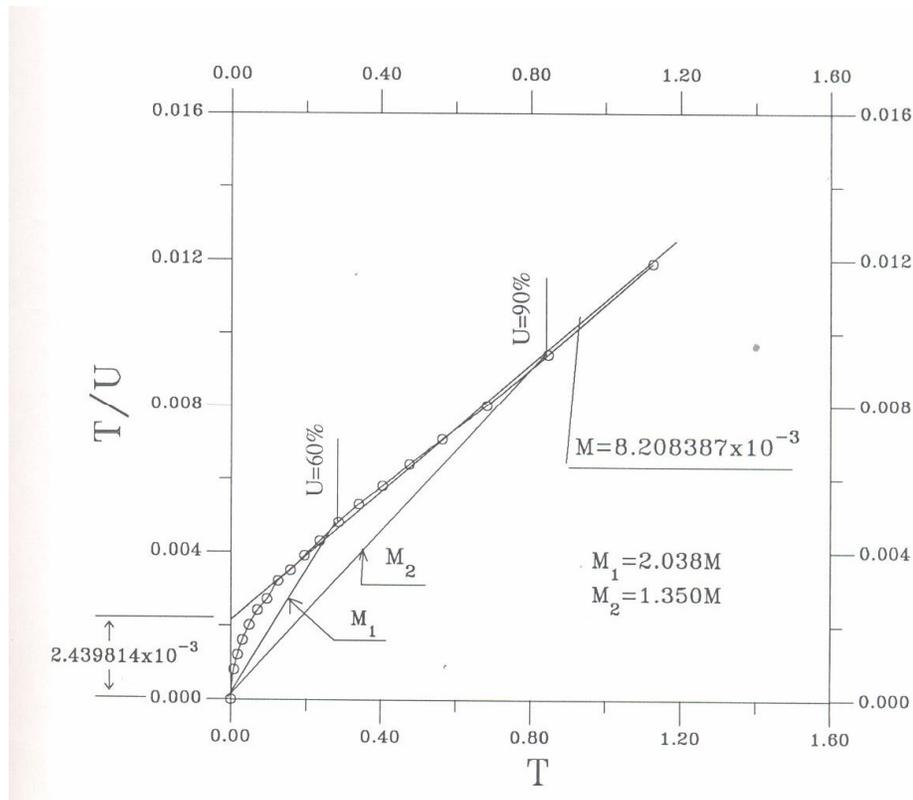


Figura 7 – Curva  $T/U$  vs  $T$  para obtenção de  $C_v$  - Método de Ajuste Retangular Hiperbólico.

Foi observado pelos autores que este gráfico é essencialmente linear no trecho entre  $U = 60\%$  e  $90\%$ , obtendo-se, assim, a seguinte equação:

$$\frac{T}{U} = 0,008208.T + 0,00244 \quad (2.12)$$

Com os resultados obtidos no ensaio de adensamento convencional, são plotados os valores correspondentes a  $t/\varepsilon_v$  vs  $t$  e obtida uma equação linear da seguinte forma:

$$\frac{t}{\varepsilon_v} = m.t + c \quad (2.13)$$

Nos gráficos  $T/U$  vs  $T$  e  $t/\varepsilon_v$  vs  $t$ , apresentados nas Figuras 7 e 8, pode-se observar que as retas traçadas pelos pontos correspondentes a  $t_{60}$  e  $t_{90}$  ou ( $U_{60}$  e  $U_{90}$ ) apresentam coeficientes angulares de 1,35 e 2,04, respectivamente.

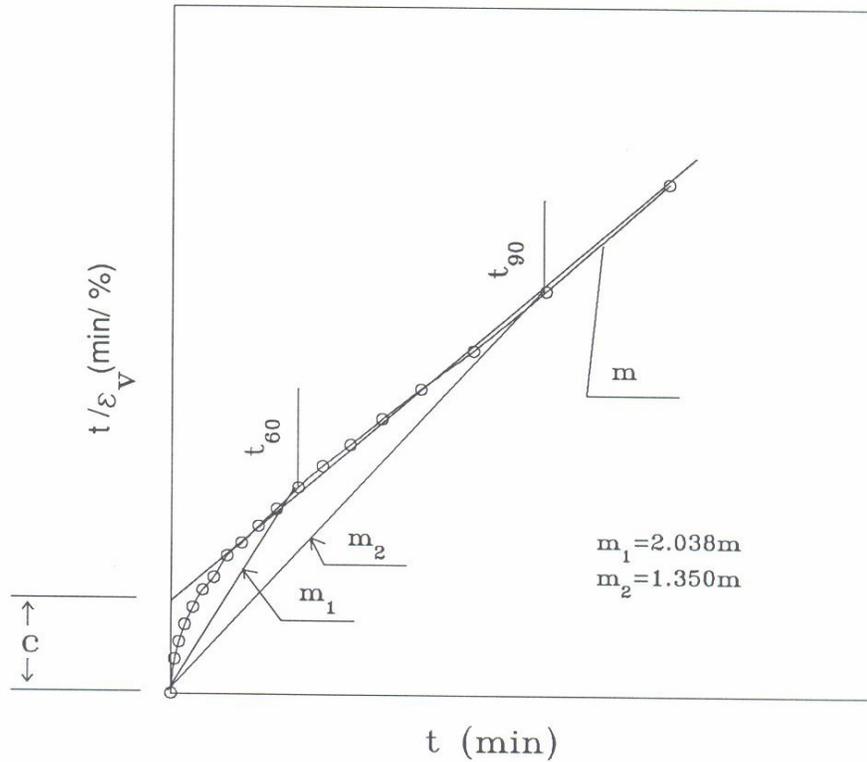


Figura 8 - Curva  $t / \varepsilon_v$  vs  $t$  para determinação de  $C_v$  - Método de Ajuste Retangular Hiperbólico.

Após transformações matemáticas, é obtida a seguinte expressão:

$$C_v = \frac{B' \cdot m \cdot H_d^2}{c} \quad (2.14)$$

onde:  $B' = 0,02972343$  (computado por diversos valores entre  $60\% \leq U \leq 90\%$ );  $H_d$  = altura efetiva de drenagem do corpo de prova;  $m$  = coeficiente angular do trecho reto da hipérbole ( $t/\varepsilon_v$  vs  $t$ );  $c$  = intercepto vertical obtido na curva  $t/\varepsilon_v$  vs  $t$ .

É recomendado pelos autores o seguinte procedimento:

- 1 – Plotar os valores  $\varepsilon_v$  e  $t$  do ensaio oedométrico e obter a curva ( $t / \varepsilon_v$  vs  $t$ ).
- 2 – Identificar o trecho reto da hipérbole.
- 3 – Obter graficamente os valores de  $m$  e  $c$ .
- 4 – Calcular o valor de  $C_v$ , mediante a Equação 2.14.

Estes autores apresentam valores médios de  $C_v$ , comparando-os aos obtidos através dos métodos de Casagrande e Taylor, concluindo que este método é menos subjetivo e mais preciso.