

CLÁUDIO PAIVA SILVA

**ENSAIO DE ADENSAMENTO COM DEFORMAÇÃO CONTROLADA (CRS):
DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA ANÁLISE E
INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586e
2018
Silva, Cláudio Paiva, 1987-
Ensaio de adensamento com deformação controlada (CRS) :
desenvolvimento de uma ferramenta para análise e interpretação
dos resultados / Cláudio Paiva Silva. – Viçosa, MG, 2018.
xvii, 84f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 77-84.

1. Deformações e tensões. 2. Reologia. 3. Solos -
Compactação. 4. Mecânica do solo - Modelos matemáticos.
5. Sistemas lineares. 6. Programas de computador .
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
II. Título.

CDD 22. ed. 624.1536

CLÁUDIO PAIVA SILVA

**ENSAIO DE ADENSAMENTO COM DEFORMAÇÃO CONTROLADA (CRS):
DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA ANÁLISE E
INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2018.


Giovani Levi Sant'anna


Roberto Lopes Ferraz
(Coorientador)


Cláudio Henrique de Carvalho Silva
(Presidente)

Dedico este trabalho a meus pais, meu irmão e minha esposa, que sempre me apoiaram desde a minha graduação.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha mãe por sempre me apoiar, me incentivar, compreender e lutar ao meu lado em todas as minhas batalhas.

Ao meu pai, que apesar de não compartilhar dessa conquista ao meu lado, fisicamente, sempre vai estar me confortando onde estiver.

Ao meu irmão, um grande amigo e indiscutível incentivador.

À minha esposa, que é e sempre será minha grande inspiração para vencer os desafios.

Aos professores Cláudio e Roberto que foram os grandes mentores deste trabalho.

Aos professores que se empenharam e se esforçaram para que eu possa me tornar um profissional capacitado.

À secretária da pós-graduação Cilene Knauf, por se mostrar à disposição para tirar qualquer dúvida, atendendo à todos com grande satisfação e alegria.

Aos funcionários do laboratório, principalmente, o Dedé, por me auxiliarem nos momentos que necessitei, tendo grande contribuição neste trabalho.

Aos meus amigos do Instituto, especialmente, ao Sandro, que dedicaram horas me ajudando a solucionar os problemas encontrados no trabalho.

De modo geral, a todos que de alguma forma participaram e contribuíram para a minha formação.

“Tudo vale a pena quando a alma não é pequena”.

Fernando Pessoa

BIOGRAFIA

CLÁUDIO PAIVA SILVA, filho de Carlos Pinto Silva e Lucia Helena Paiva Silva, nascido em 11 de fevereiro de 1987, na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais.

Em dezembro de 2004, concluiu o Ensino Médio na escola “Instituto Metodista Granbery”, em Juiz de Fora, Minas Gerais.

Em março de 2005, iniciou o curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Juiz de Fora e o concluiu em novembro de 2012.

Em 2013, ingressou como professor substituto no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas – Campus Juiz de Fora no curso Técnico de Edificações, onde atuou até março de 2015.

Em abril de 2014, iniciou a curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho na Universidade Federal de Juiz de Fora e concluiu o mesmo em agosto de 2015.

Em maio de 2015, ingressou como professor efetivo no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Campus Nova Venécia, sendo transferido para o campus Juiz de Fora em agosto de 2015, onde atua até hoje.

Em março de 2015, ingressou no programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, na área de concentração em Geotecnia, atuando na linha de pesquisa “Geotecnia analítica e experimental”.

LISTA DE SÍMBOLOS

a_v	Coeficiente de compressibilidade
b	constante que depende da variação do índice de vazios com a profundidade e o tempo
C_c	Índice de compressão
CR	Relação de compressão
C_r	Índice de recompressão
C_s	Índice de descarregamento
C_a	Coeficiente de compressão secundária
c_v	Coeficiente de adensamento
D	Módulo edométrico
e	Índice de vazios
e_i	Índice de vazios inicial
e_m	Índice de vazios médio
H	Altura média do corpo de prova entre os tempos t_1 e t_2
H_0	Altura inicial do corpo de prova
H_d	Distância de drenagem
K	Condutividade hidráulica
m_v	Coeficiente de compressibilidade volumétrica
RR	Relação de recompressão
s	Taxa de variação do índice de vazios médio

t	Tempo
t_{50}	Tempo para ocorrência de 50% do adensamento primário
t_{90}	Tempo para ocorrência de 90% do adensamento primário
T_v	Fator tempo
u_b	Poropressão na base
u_u	Poropressão na face não drenada do corpo de prova
u_d	Poropressão na face drenada do corpo de prova
δu	Gradiente de poropressão ao longo do corpo de prova
z	Coordenada vertical
Δe	Varição do índice de vazios
Δh	Deslocamento vertical
Δh_0	Deslocamento vertical inicial
Δh_i	Deslocamento vertical instantâneo
$\Delta \sigma'_v$	Varição da tensão vertical efetiva
e	Deformação
e_v	Deformação específica vertical
Δe_v	Varição da deformação específica vertical
a	Relação entre a poropressão média e a poropressão na base
γ_s	Peso específico das partículas sólidas
γ_d	Peso específico aparente seco
γ_w	Peso específico da água
σ_v	Tensão vertical total

σ'_v	Tensão vertical efetiva
σ'_{vm}	Tensão de pré-adensamento

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CRS	Constant Ratio of Strain
kPa	Quilopascal
kgf/cm ²	Quilograma-força por centímetro quadrado
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
NBR	Norma Brasileira
SIC	Standart Incremental Consolidation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação das trajetórias de carregamento dos ensaios de adensamento.....	2
Figura 2: Analogia mecânica do adensamento	8
Figura 3: Montagens no ensaio de adensamento: (A) anel fixo; (B) anel flutuante.	10
Figura 4: Curva do índice de vazios versus tensão vertical efetiva na escala log ($e \times \log \sigma'_v$)	12
Figura 5: Gráfico do índice de vazios em função do $\log \sigma'$ mostrando os trechos de carregamento, descarregamento e recarregamento	13
Figura 6: Determinação da tensão de pré-adensamento pelo método do Casagrande	14
Figura 7: Determinação da tensão de pré-adensamento pelo método do Pacheco Silva.....	15
Figura 8: Método de Casagrande para a determinação do c_v	16
Figura 9: Método de Taylor na determinação do c_v	17
Figura 10: Esquema geral do ensaio CRS	21
Figura 11: Comparação entre curvas do ensaio convencional e do ensaio CRS	27
Figura 12: Comparação entre o c_v do ensaio convencional e do ensaio CRS..	28
Figura 13: Comparação entre o coeficiente de adensamento calculado pela teoria linear e pela teoria não linear	40
Figura 14: Desenho esquemático do molde para compactação de corpos de prova	49
Figura 15: Solo sendo compactado dentro no anel metálico.....	49

Figura 16: Solo compactado dentro do anel metálico	50
Figura 17: Superfície de solo excedente do anel sendo rasada	50
Figura 18: Corpo de prova dentro da célula CRS	51
Figura 19: Célula CRS pronta para ser ensaiada.....	52
Figura 20: Execução do ensaio CRS com o uso de uma prensa do ensaio triaxial	53
Figura 21: Tela inicial do programa AnáliseCRS.....	54
Figura 22: Exemplo da configuração do arquivo com os dados de entrada	56
Figura 23: Gráficos de tensão vertical efetiva x deformação vertical - Teoria linear	59
Figura 24: Gráficos de tensão vertical efetiva x deformação vertical - Teoria não linear.....	59
Figura 25: Comparativo do gráfico da tensão vertical efetiva x coeficiente de adensamento.....	60
Figura 26: Comparativo do gráfico do índice de vazios x condutividade hidráulica	61
Figura 27: Gráfico comparativo da tensão vertical efetiva x índice de vazios...	62
Figura 28: Curva granulométrica da Amostra 01	63
Figura 30: Gráfico da tensão de adensamento x deformação vertical do corpo de prova	66
Figura 35: Tensão vertical efetiva x deformação vertical - Ensaio de adensamento incremental e ensaio CRS com o corpo de prova 1	71
Figura 36: Tensão vertical efetiva x índice de vazios - Ensaio de adensamento incremental e ensaio CRS com o corpo de prova 1	72

Figura 37: Tensão vertical efetiva x deformação vertical - Ensaio de adensamento incremental e ensaio CRS com o corpo de prova 2.....73

Figura 38: Tensão vertical efetiva x índice de vazios - Ensaio de adensamento incremental e ensaio CRS com o corpo de prova 273

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados obtidos a partir das leituras realizadas no ensaio CRS	21
Tabela 2: Recomendação da norma ASTM D 4186 para velocidades de deformação.....	22
Tabela 3: Recomendações para a razão u_b/σ_v	23
Tabela 4: Velocidades de ensaio CRS utilizadas nos ensaios de Carvalho (1989)	24
Tabela 5: Velocidades de ensaio CRS utilizadas nos ensaios de Spannenberg (2003).....	24
Tabela 6: Valores de tensão de pré-adensamento e OCR.....	30
Tabela 7: Variação de α em função da relação b/s.....	34
Tabela 8: Tabela com os resultados do ensaio CRS (Vitor, 2012).....	58
Tabela 9: Resultados dos ensaios de caracterização e de compactação	62
Tabela 10: Características do corpo de prova no ensaio de adensamento incremental	64
Tabela 11: Leituras do ensaio de adensamento convencional referentes às fases de carregamento e descarregamento do corpo de prova.....	65
Tabela 12: Características gerais do corpo de prova 1 para o ensaio CRS	67
Tabela 13: Características gerais do corpo de prova 2 para o ensaio CRS	68

RESUMO

SILVA, Cláudio Paiva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Ensaio de adensamento com deformação controlada (CRS): Desenvolvimento de uma ferramenta para análise e interpretação dos resultados.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga. Coorientadores: Roberto Lopes Ferraz e Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a análise e interpretação do ensaio de adensamento com taxa de deformação constante (CRS), denominada AnáliseCRS. No programa desenvolvido foram implementados algoritmos de cálculo com base em uma teoria linear e outra não linear. A validação dos algoritmos de cálculo, com base em resultados publicados na literatura, mostrou que o programa desenvolvido processa os cálculos de forma rápida e coerente com os trabalhos tomados como referência. A comparação dos resultados de ensaios de adensamento incremental e CRS, realizados em corpos de prova compactados, mostrou que as teorias implementadas no programa AnáliseCRS representam muito bem os resultados do ensaio incremental. Estes resultados reforçam as afirmações da literatura de que o ensaio CRS é uma excelente opção para substituir os ensaios de adensamento incremental. No entanto, por ser de interpretação trabalhosa, a ferramenta computacional desenvolvida nessa pesquisa pode auxiliar em muito na análise e interpretação do ensaio CRS, além de estimular o uso do mesmo.

ABSTRACT

SILVA, Cláudio Paiva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Controlled deformation densification test (CRS): Development of a tool for analysis and interpretation of results.** Adviser: Heraldo Nunes Pitanga. Co-advisers: Roberto Lopes Ferraz and Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

This paper presents the development of a computational tool for the analysis and interpretation of the constant rate of strain (CRS) test, called AnáliseCRS. In the developed software, computational algorithms were implemented based on a linear and non-linear theory. The validation of the calculation algorithms, based on results published in the literature, showed that the developed program processes the calculations quickly and coherently with the works taken as reference. Comparison of incremental densification and CRS results on compacted specimens showed that the theories implemented in the AnáliseCRS program represent very well the results of the incremental test. These results support the assertions in the literature that the CRS assay is an excellent option to replace incremental densification assays. However, because of the laborious interpretation, the computational tool developed in this research can greatly assist in the analysis and interpretation of the CRS test, besides stimulating its use.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	5
1.2	ORGANIZAÇÃO	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	A TEORIA DO ADENSAMENTO	7
2.2	ENSAIO DE ADENSAMENTO INCREMENTAL	9
2.2.1	Parâmetros obtidos a partir do Ensaio de Adensamento Incremental	15
2.3	O ENSAIO DE ADENSAMENTO COM TAXA DE DEFORMAÇÃO CONSTANTE – CRS	19
2.3.1	Considerações Iniciais.....	20
2.3.2	Determinação da Velocidade de Ensaio	22
2.3.3	Histórico	24
2.3.4	Parâmetros de Adensamento no ensaio CRS	31
2.3.4.1	Teoria linear de Smith e Wahls (1969).....	32
2.3.4.2	Teoria linear de Wissa <i>et al.</i> (1971)	35
2.3.4.3	Teoria não linear de Wissa <i>et al.</i> (1971)	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	FERRAMENTA COMPUTACIONAL	41
3.1.1	Características gerais da Ferramenta Computacional	41
3.1.2	Formulações Utilizadas e Cálculos Executados	42
3.1.3	Preparação dos Resultados.....	44
3.2	VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	46
3.3	O SOLO UTILIZADO	46
3.4	ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	47
3.5	ENSAIOS DE ADENSAMENTO	47

3.5.1	Ensaio Edométrico Incremental	47
3.5.2	Ensaio CRS	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	PROGRAMA AnáliseCRS	54
4.2	VALIDAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA	56
4.2.1	Validação com os dados de Vitor (2012)	57
4.2.2	Validação com os dados de Ferraz (1996)	61
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	62
4.4	ENSAIO DE ADENSAMENTO INCREMENTAL	64
4.5	ENSAIO CRS	67
4.6	COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS INCREMENTAL E CRS	71
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	75
5.1	CONCLUSÕES	75
5.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

O termo adensamento tem sido utilizado desde o século XIX para identificar o fenômeno observado na natureza, no qual tem-se uma variação de volume da massa de solo associada à expulsão da água dos poros, de forma lenta e gradual, devido a imposição de uma sobrecarga (CARVALHO, 1989).

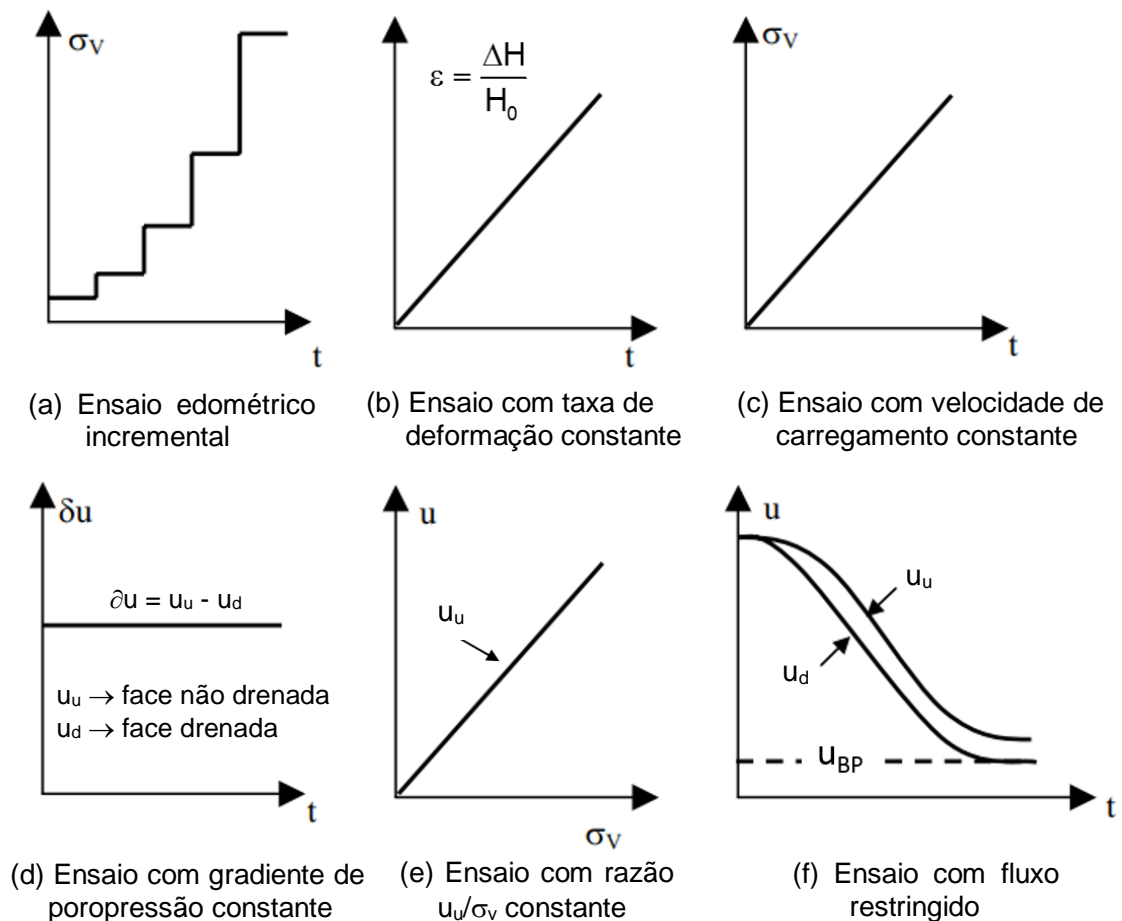
Somente na década de 1920 o fenômeno do adensamento passou a ter um desenvolvimento teórico e uma sólida base experimental. Terzaghi desenvolveu um procedimento para a determinação dos parâmetros básicos de compressibilidade de solos em ambiente de laboratório. Foi ele também quem descreveu as bases do ensaio edométrico incremental ou SIC (Standard Incremental Consolidation), que foi posteriormente padronizado por Taylor (1942).

No Brasil este ensaio é normatizado pela norma ABNT NBR 12007 - Solo - Ensaio de adensamento unidimensional - Método de ensaio (ABNT, 1990), e tem uma duração prevista entre 10 e 15 dias. A curva tensão vertical versus deformação vertical, representada pelo índice de vazios, não é contínua e às vezes dificulta a definição da tensão de pré-adensamento (ou plastificação), uma vez que a curva é obtida a partir do ajuste aos pontos obtidos no ensaio. Também se verifica que a velocidade de adensamento no campo é maior que a verificada neste ensaio de laboratório em função da maior permeabilidade *in situ* e de diferentes condições de drenagem lateral (SOARES, 1997). Além disso, o ensaio não se aplica a solos muito moles, com teor de umidade muito elevado, pois os dispositivos não vedam a passagem dos sólidos (LIMA, 1996).

Segundo Lima (1996), nas últimas décadas foram desenvolvidos inúmeros ensaios de adensamento com o intuito de contornar as dificuldades encontradas no ensaio edométrico incremental. Dentre estes podem ser citados o ensaio de adensamento com taxa de deslocamento constante (SMITH e WAHLS, 1969 e WISSA et al., 1971); o ensaio de adensamento com taxa de carregamento constante (ABOSHI et al., 1970); ensaio de adensamento com gradiente de poropressão constante ou de gradiente controlado (LOWE et al., 1969); o ensaio

de adensamento com razão constante entre a poropressão e a tensão vertical aplicada (JANBU et al., 1981); o ensaio de adensamento com fluxo restringido (LEE, 1981) e o ensaio de adensamento hidráulico (IMAI, 1979). Na Figura 1 são apresentadas graficamente as trajetórias de carregamento de diversos dos ensaios de adensamento citados.

Figura 1: Representação das trajetórias de carregamento dos ensaios de adensamento



Fonte: Adaptado de HEAD, 1986.

As principais características dos ensaios citados, conforme descrito em Head (1986), são apresentadas a seguir.

Em princípio, o ensaio com taxa de deformação constante (Figura 1-b), consiste em carregar o corpo de prova de forma a obter uma velocidade de deformação vertical constante (CRS). Porém, como nos ensaios de laboratório a taxa de

deformação é obtida por meio do deslocamento do prato da prensa a uma velocidade constante ($\partial(\Delta H)/\partial t = \text{constante}$), este ensaio também é denominado de ensaio de adensamento com taxa de deslocamento constante (CRD). Mas, se for considerado que as deformações são sempre calculadas em relação à altura inicial do corpo de prova ($\varepsilon = \Delta H/H_0$), a realização do ensaio da forma descrita também será a uma taxa de deformação constante, ou seja, $\partial\varepsilon/\partial t = \text{constante}$.

No ensaio com taxa de carregamento constante (Figura 1-c) a tensão vertical é aumentada a uma taxa constante ($\partial\sigma_v/\partial t = \text{constante}$).

No ensaio com gradiente de poropressão constante (Figura 1-d) procura-se carregar o corpo de prova de forma controlada visando manter a diferença de poropressão (∂u) entre o topo e a base do corpo de prova constante ($\partial u = u_u - u_d = \text{constante}$).

No ensaio com razão constante entre poropressão e tensão vertical (Figura 1-e) o carregamento também é aplicado de forma controlada, de forma que a poropressão na face não drenada (u_u) seja sempre uma proporção fixa da tensão vertical total aplicada ($u_u/\sigma_v = \text{constante}$).

No ensaio de adensamento com fluxo restringido (Figura 1-f) o fluxo de água através do corpo de prova é restringido por um controlador de fluxo de forma que a poropressão na face drenada, u_d , decresça lentamente até atingir o valor da contrapressão, u_{BP} , e o gradiente hidráulico através do corpo de prova permaneça baixo, de forma que $\partial u_d/\partial t$ seja aproximadamente igual a $\partial u_w/\partial t$.

Lima (1996) discute sobre as principais vantagens e desvantagens de alguns dos ensaios citados, conforme descrito nos parágrafos a seguir.

No caso do ensaio de adensamento com gradiente controlado, para uma correta interpretação dos resultados é necessário que o mesmo seja executado com velocidades de aplicação da carga baixas, tornando o ensaio muito demorado.

Como desvantagens do ensaio de adensamento com taxa de carregamento constante citam-se que os critérios de determinação da velocidade de

carregamento não são bem definidos e que a interpretação dos ensaios não pode ser aplicada para grandes deformações.

Quanto ao ensaio de adensamento com fluxo restringido cita-se que no mesmo não é possível medir a permeabilidade do corpo de prova e nem existe um critério para escolher o restritor de fluxo mais adequado.

Dos ensaios descritos, o ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS - *Constant Rate of Strain*) tem como principal vantagem o fato do equipamento usado no ensaio ser bem simples, consistindo de um sistema de aplicação do carregamento contínuo, que pode ser uma prensa com controle de velocidade, tal como a do triaxial, dispositivos para a medição das poropressões geradas e aplicação de contrapressão.

Comparando com o ensaio de adensamento incremental, o ensaio CRS tem como principal vantagem o tempo necessário para sua realização, que é bem inferior. Porém, apresenta como desvantagens a dificuldade de definição de uma velocidade ideal para condução do ensaio e o procedimento para interpretação do ensaio, que pode ser bastante trabalhoso, dependendo da teoria adotada.

Porém, em função da simplicidade do equipamento, a não necessidade de controles mais sofisticados durante o ensaio e o tempo reduzido para a sua execução, o ensaio CRS tem sido a principal opção para substituir o ensaio de adensamento incremental. Dessa forma, procurando contornar as dificuldades relacionadas com a interpretação do ensaio, busca-se neste trabalho elaborar uma metodologia e desenvolver uma ferramenta para auxiliar nas atividades de análise do mesmo.

Apesar da demanda por esse tipo de ensaio ter sido crescente nos últimos anos, percebe-se que grande parte dos usuários fazem sua interpretação por meio de planilhas eletrônicas, envolvendo um grande volume de trabalho. Portanto, o desenvolvimento e a disponibilização de uma ferramenta como a proposta para desenvolvimento nesse trabalho, iria auxiliar em muito na interpretação do ensaio, além de incentivar seu uso.

1.1 OBJETIVOS

O foco principal deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional para processar os dados obtidos no ensaio de adensamento com taxa de deformação constante, com base nas teorias lineares e não lineares existentes sobre o ensaio. Como resultado, busca-se uma ferramenta que possa fornecer os gráficos e os parâmetros de adensamento do solo de forma mais eficiente, precisa e automática.

O intuito é elaborar um *software* que possa ser utilizado para interpretar os ensaios CRS e fornecer os resultados esperados com a mesma eficácia que os obtidos em ensaios convencionais de adensamento, porém em um tempo muito menor.

Como objetivo complementar, pretende-se fazer uma comparação entre resultados de ensaios incrementais e CRS, obtidos a partir de ensaios realizados para esta pesquisa ou de resultados disponíveis na literatura.

1.2 ORGANIZAÇÃO

Esta pesquisa foi dividida em cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

O primeiro capítulo contém a introdução do assunto, onde é apresentado o tema e são definidos os objetivos que delinearão a realização do trabalho.

O segundo capítulo contém uma revisão bibliográfica, na qual apresenta-se a descrição do ensaio de adensamento, a teoria apresentada por Terzaghi e um resumo da realização do ensaio incremental. Também é abordado um histórico sobre o desenvolvimento do ensaio de adensamento com taxa de deformação constante. São apresentadas as teorias para interpretação dos dados obtidos

com o ensaio CRS, dentre as quais se destacam as de Smith e Wahls (1969) e a de Wissa *et al.* (1971).

O terceiro capítulo refere-se aos materiais e métodos empregados para o desenvolvimento proposto na dissertação, apresentando-se a ferramenta computacional desenvolvida e os parâmetros que foram adotados para a criação das janelas e opções de processamento. A seguir são descritas as metodologias referentes aos ensaios realizados para o estudo comparativo entre os ensaios de adensamento incremental e CRS.

O quarto capítulo contém a apresentação e análise dos resultados obtidos.

E por fim, o quinto capítulo, apresenta as conclusões sobre os resultados obtidos na pesquisa e as sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A TEORIA DO ADENSAMENTO

O adensamento é a redução gradativa do volume de uma massa de solo totalmente saturada e com baixa permeabilidade, que está sendo submetida a uma variação de tensão efetiva. Este fenômeno pode ocorrer por diversas atividades da engenharia, como por exemplo, a aplicação de uma sobrecarga sobre o solo; a drenagem de um determinado volume de água dos poros ou por bombeamento da água do solo (KNAPPETT e CRAIG, 2016).

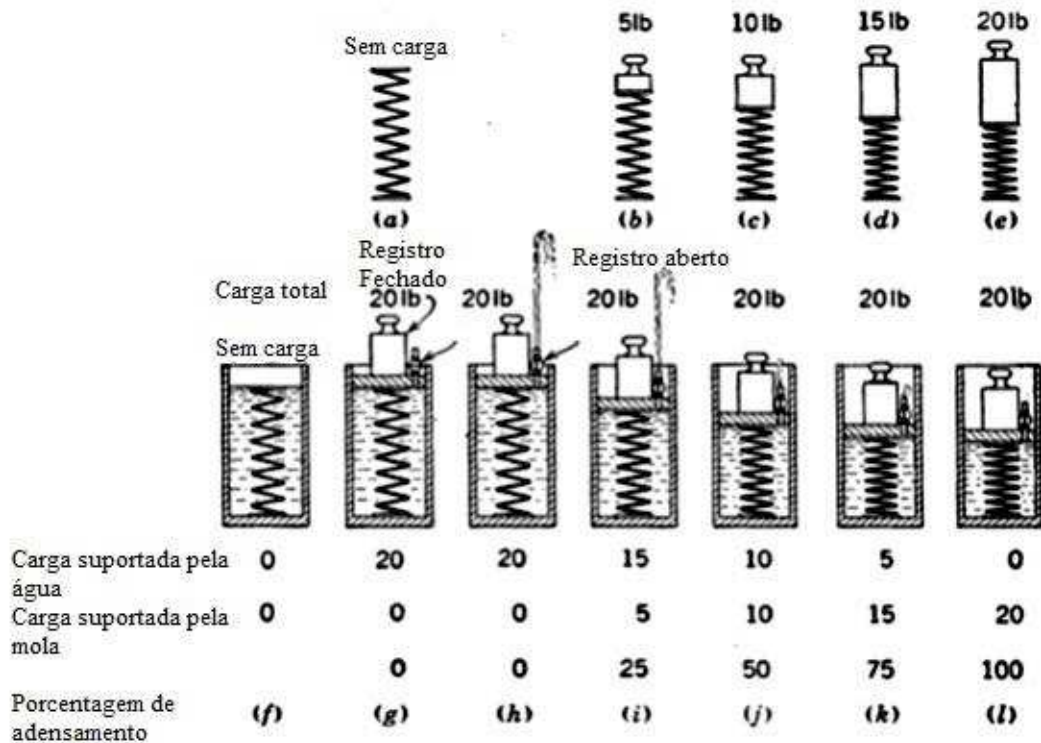
Para facilitar o entendimento deste fenômeno, Taylor (1948) propôs uma analogia entre a estrutura de um solo saturado e uma mola dentro de um pistão cheio de água, no qual dispõe-se de um pequeno orifício para saída da água, como apresentado na Figura 2. A mola representa o esqueleto sólido do solo e o pequeno orifício, que inicialmente se encontra com o registro fechado, representa a baixa permeabilidade.

Aplicando-se uma carga no pistão a mola não irá se deformar imediatamente, pois a água ainda não terá começado a sair, ou seja, toda a carga aplicada será suportada pela água. Abrindo-se o registro a água começa a extravasar de dentro do pistão e uma deformação começa a aparecer na mola, como resultado da transferência de uma parcela do carregamento aplicado no pistão. O processo é contínuo e alcança um momento onde toda a carga aplicada estará sendo suportada apenas pela mola, quando então se observa que a água para de sair do pistão.

Fazendo essa analogia para o solo, tem-se que quando um acréscimo de tensão é aplicado, ocorre um aumento da poropressão equivalente ao valor aplicado, ou seja, a água recebe no instante inicial todo o carregamento. Neste momento a deformação do solo é nula, pois está ocorrendo uma variação da tensão total devido à sobrepressão na água, e não variação de tensão efetiva, que é a responsável por provocar deformações nos solos. Com o passar do tempo, ocorre o processo de percolação da água em direção às áreas mais permeáveis,

gerando uma redução do índice de vazios, que resulta em uma deformação do solo devido ao aumento da tensão efetiva, exatamente como aconteceu com a mola (PINTO, 2006).

Figura 2: Analogia mecânica do adensamento



Fonte: TAYLOR, 1948.

Fazendo uma análise microscópica do fenômeno, verifica-se que o equilíbrio entre as forças de interação das partículas e o arranjo de equilíbrio existente entre elas é quebrado com a ação externa. Já, de forma macroscópica, ocorre uma variação da poropressão e da tensão efetiva (MASSAD, 2016).

Para fins de análise, pode-se considerar o processo do adensamento como composto por duas etapas: o adensamento primário e o adensamento secundário.

Segundo Massad (2016), durante o regime transiente que ocorre no solo em função do aumento das tensões efetivas (dissipação do excesso de poropressão), os minerais coloidais do solo tendem a se aproximar, buscando

uma nova organização de equilíbrio e desta forma provocam uma alteração nas forças de atração e repulsão das mesmas, sendo este processo conhecido como adensamento primário.

Segundo Garcia (1996), o estudo do adensamento secundário pode ser conduzido com base em duas hipóteses. A primeira delas, chamada de hipótese "A", sugere que para ocorrer o adensamento secundário é necessário que tenha terminado o adensamento primário, além de que a curva "e versus $\log(\sigma'_v)$ " não seria afetada por valores da espessura da camada. Já, a segunda, denominada de hipótese B, sugere a existência de uma força viscosa que atua concomitantemente com o adensamento primário, sendo ela responsável pelo adensamento secundário. Nesta hipótese, não existe uma distinção entre as duas fases, sendo que, de forma geral, o adensamento seria um fenômeno no qual ocorre a redução da resistência viscosa e a dissipação da poropressão simultaneamente.

Segundo Pinto (2006), o desenvolvimento da teoria do adensamento de Terzaghi é baseado em nove hipóteses: (i) o solo é totalmente saturado; (ii) a compressão é unidimensional; (iii) o fluxo da água é unidimensional; (iv) o solo é homogêneo; (v) as partículas sólidas e a água são incompressíveis diante da compressibilidade do solo; (vi) o solo pode ser analisado como partes infinitesimais, mesmo sendo sabido que é constituído de partículas e vazios; (vii) o fluxo é regido pelo Lei de Darcy; (viii) as propriedades do solo são invariáveis durante o processo; (ix) o índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva.

2.2 ENSAIO DE ADENSAMENTO INCREMENTAL

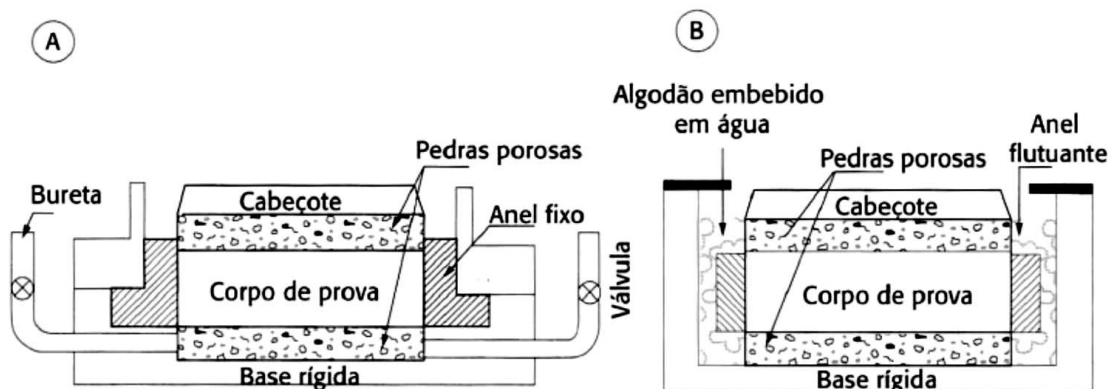
A execução do ensaio de adensamento incremental tem como objetivo estudar os recalques das estruturas provocados pelo adensamento, devendo-se para isso determinar os parâmetros de compressibilidade e de adensamento dos solos sobre os quais estão apoiadas (CAPUTO, 1988).

Segundo Andrade (2009), a realização deste ensaio em laboratório, além de permitir obter a curva de compressão edométrica ($e \times \sigma'_v$ ou $e \times \sigma'_v$) e determinar o coeficiente de adensamento do solo (c_v), possibilita também determinar as condições de adensamento em que a camada compressível se encontra no campo (normalmente adensada, pré-adensada ou em processo de adensamento).

A norma ABNT NBR 12007 (ABNT, 1990), descreve a aparelhagem e a metodologia necessária para a realização do ensaio. A altura do corpo de prova deve ser, no mínimo, 13 mm e não inferior a dez vezes o máximo diâmetro da partícula. O anel de adensamento utilizado no ensaio pode ser do tipo fixo ou flutuante (Figura 3), sendo que a relação entre o seu diâmetro interno e a altura deve ser, no mínimo, 2,5 (preferencialmente 3,0). Após a montagem da célula de adensamento, deve-se colocar o cabeçote metálico de carregamento, ajustando-se, então, o conjunto ao sistema de aplicação de carga.

Com o equipamento preparado, procede-se à realização do ensaio de adensamento, cuja metodologia consiste em aplicar estágios sucessivos de carregamento vertical no corpo de prova, medindo-se a sua variação de altura ao longo do tempo.

Figura 3: Montagens no ensaio de adensamento: (A) anel fixo; (B) anel flutuante.



Fonte: MASSAD, 2016.

Cada estágio de carregamento permanece atuando até que cessem as deformações originadas pelo mesmo (na prática, normalmente 24 horas). Em seguida, aumenta-se o carregamento aplicando geralmente o dobro do carregamento que estava atuando anteriormente. Por exemplo: 1º estágio: 12,5 kPa; 2º estágio: 25 kPa; 3º estágio: 50 kPa e assim sucessivamente. Eventualmente, a valor do incremento de carga pode ser menor que 100%, podendo-se utilizar incrementos de 40 a 50% com o intuito de melhorar a definição da tensão de pré-adensamento (MASSAD, 2016).

Segundo a teoria de Terzaghi (1948), a estabilização das leituras de deslocamento vertical corresponde ao término do adensamento para este estágio. Caso esteja sendo utilizado o anel fixo, ao final de cada estágio de carregamento pode ser realizado o ensaio de permeabilidade para determinação do coeficiente de permeabilidade do solo, referente ao índice de vazios do estágio.

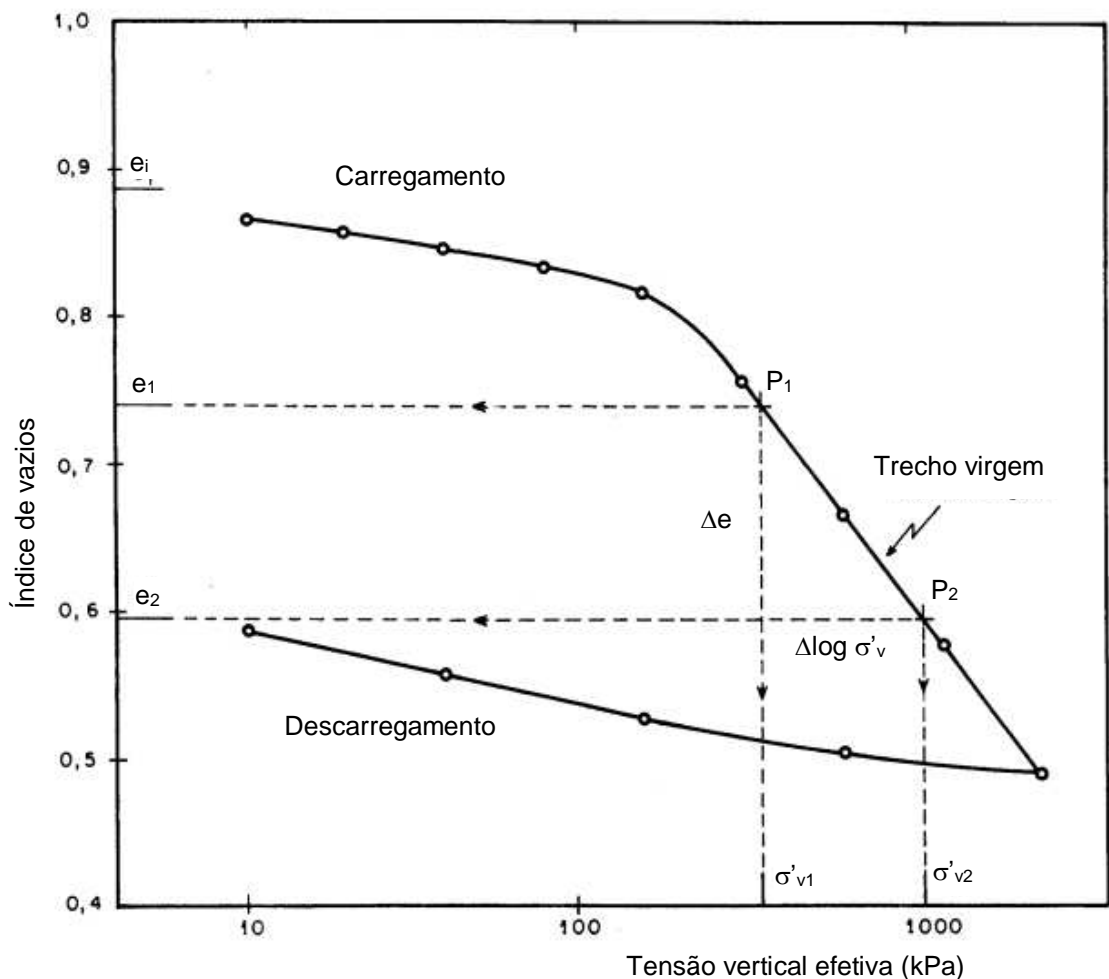
Segundo Montemezzo (2005), a realização do ensaio possibilita determinar além da deformação vertical, devido à dissipação da poropressão, alguns parâmetros importantes do solo, como: tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}); coeficiente de compressibilidade (a_v); coeficiente de variação volumétrica (m_v); módulo edométrico (D); índice de compressão (C_c); índice de recompressão (C_r); índice de descarregamento (C_s); coeficiente de adensamento (c_v) e coeficiente de compressão secundária (c_a).

Na Figura 4 é ilustrado um resultado típico de um ensaio de adensamento incremental, na qual observa-se que a curva referente ao carregamento possui uma pequena inclinação no trecho inicial, seguida de uma relação linear entre as grandezas. Esse comportamento pode ser explicado considerando que inicialmente a massa de solo no campo já foi submetida à um certo valor de tensão vertical efetiva na profundidade em que se encontrava, a qual foi aliviada quando a amostra foi coletada e trazida para a superfície. A máxima tensão a que uma amostra de solo tenha sido submetida no passado é denominada de tensão de pré-adensamento, σ'_{vm} . Assim, durante a realização do ensaio, enquanto a tensão vertical aplicada for inferior à tensão de pré-adensamento,

a variação do índice de vazios será pequena. Porém, quando a tensão vertical aplicada ultrapassar o valor já recebido pelo solo em tempos passados, será observada uma variação do índice de vazios bem mais acentuada, sendo que o trecho em que isso ocorre é denominado de trecho de compressão virgem (DAS, 2011). Definindo-se dois pontos sobre o trecho de compressão virgem (P_1 e P_2) pode calcular o valor do índice de compressão (C_c), conforme a Equação 1.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (1)$$

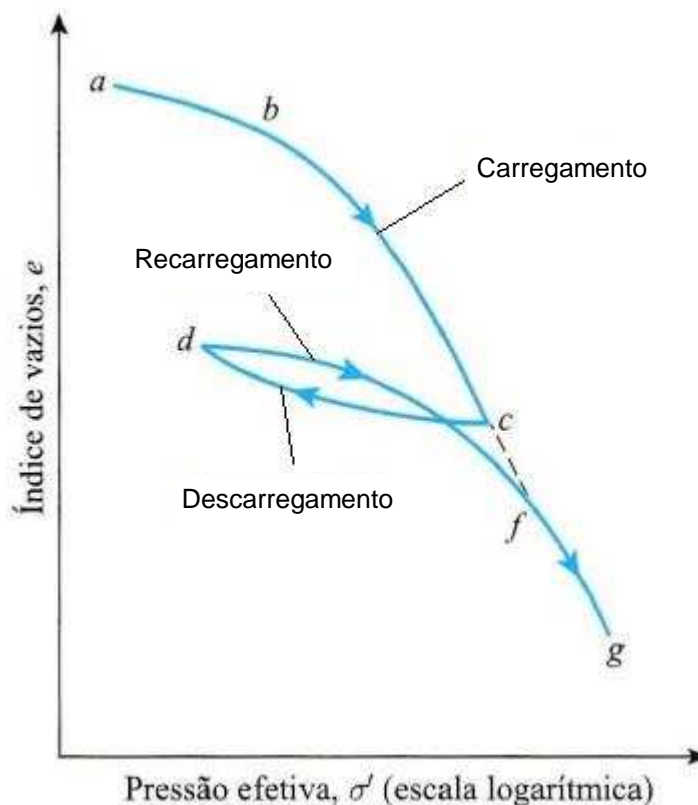
Figura 4: Curva do índice de vazios versus tensão vertical efetiva na escala log (e x $\log \sigma'_v$)



Fonte: Adaptado de ABNT, 1990.

A Figura 5 ilustra como ocorre o registro do histórico de tensões pelo solo. Conforme mostrado na figura, caso uma amostra de solo seja inicialmente carregada segundo a curva abc, e depois descarregada até o ponto d, a tensão correspondente ao ponto c passa a ser a maior tensão à qual o solo já esteve submetido (tensão de pré-adensamento). Portanto, ao proceder um novo carregamento da amostra, será desenvolvida a curva afg, onde se observa que somente após ser ultrapassada a tensão correspondente ao ponto c, a variação do índice de vazios passa a ser maior. Após o recarregamento, o valor de tensão correspondente ao ponto g passa a ser a nova tensão de pré-adensamento.

Figura 5: Gráfico do índice de vazios em função do $\log \sigma'$ mostrando os trechos de carregamento, descarregamento e recarregamento



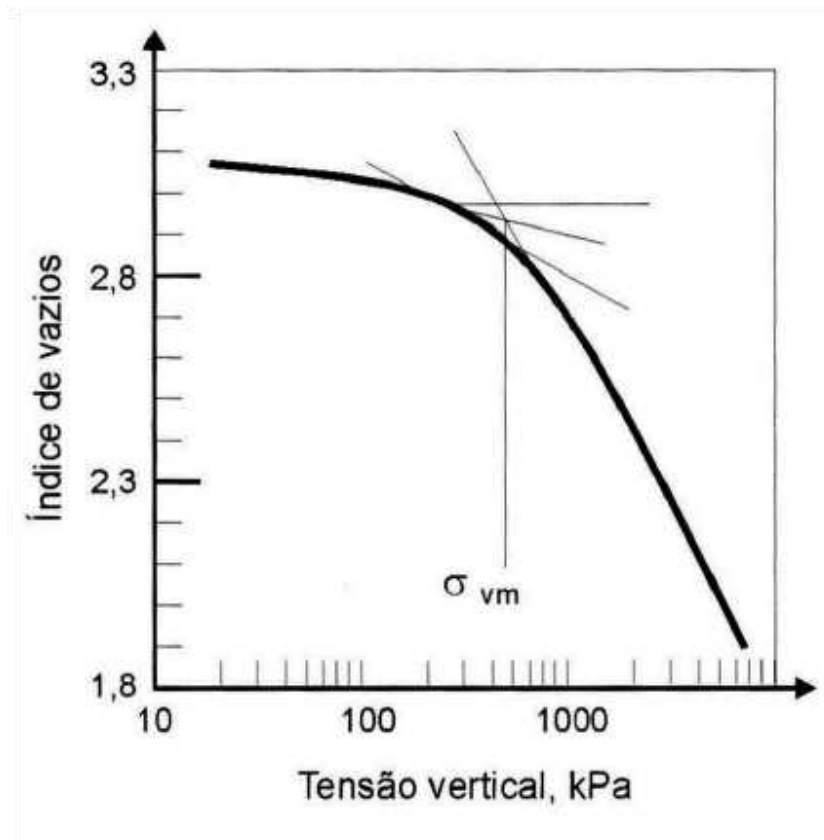
Fonte: DAS, 2011

Segundo seu histórico de tensões, os solos podem ser classificados em: (a) Normalmente adensados, onde a máxima tensão efetiva suportada no passado (tensão de pré-adensamento, σ'_{vm}) é igual à tensão vertical efetiva atual;

(b) Sobreadensados, são aqueles em que a tensão vertical efetiva atual é inferior ao valor da tensão de pré-adensamento (DAS, 2011).

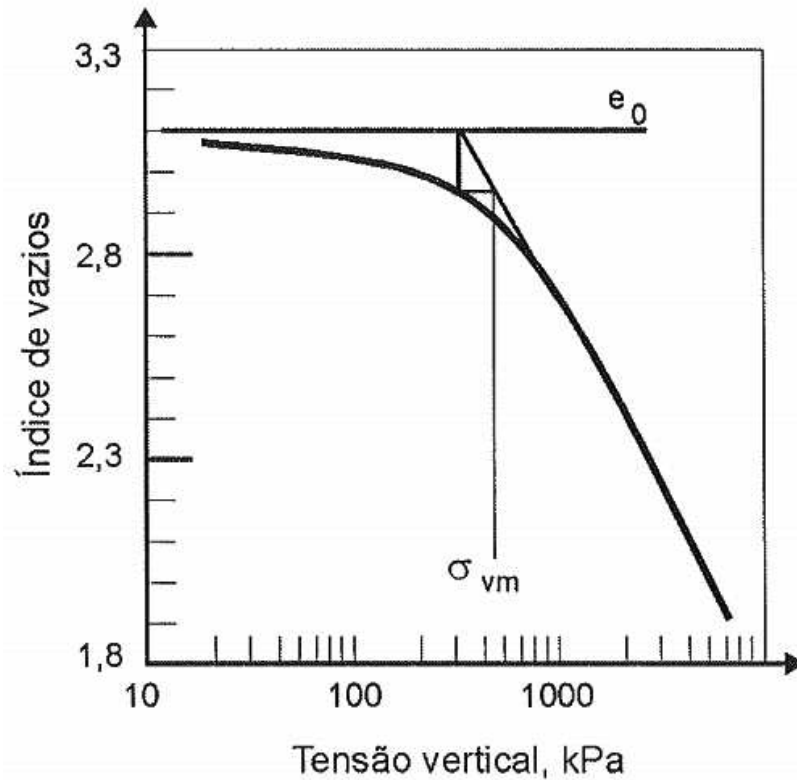
Dentre os métodos para estimar o valor da tensão de pré-adensamento citam-se o de Casagrande, apresentado na Figura 6, e o de Pacheco Silva, apresentado na Figura 7. Detalhes quanto ao emprego desses métodos podem ser encontrados em Pinto (2006) e ABNT (1990).

Figura 6: Determinação da tensão de pré-adensamento pelo método do Casagrande



Fonte: PINTO, 2006

Figura 7: Determinação da tensão de pré-adensamento pelo método do Pacheco Silva



Fonte: PINTO, 2006.

2.2.1 Parâmetros obtidos a partir do Ensaio de Adensamento Incremental

A seguir são relacionados os demais parâmetros do solo que podem ser determinados a partir do ensaio de adensamento incremental.

Um dos mais importantes é o coeficiente de adensamento (c_v), que é relacionado com a velocidade de adensamento, e por meio do qual podem ser estimados os tempos necessários para a dissipação do excesso de poropressão gerado pelo carregamento aplicado (MOURA, 2004).

Segundo Massad (2016), a forma de se obter o coeficiente de adensamento é procedendo a um ajuste entre a curva de adensamento teórica e a experimental. Podem ser utilizados diferentes métodos para a determinação deste parâmetro, dentre os quais citam-se o de Pinto (1970), o de Asaoka (1978) e o de Baguelin (1999). Porém, os mais utilizados são os métodos de Casagrande e de Taylor, os quais são abordados a seguir.

- a) Método de Casagrande: a aplicação deste método consiste em inicialmente determinar o início e o término do adensamento primário e, a seguir, proceder ao ajuste do ponto da curva correspondente a 50% do adensamento primário, o que resulta na Equação 2:

$$c_v = \frac{H_d^2 \times 0,198}{t_{50}} \quad (2)$$

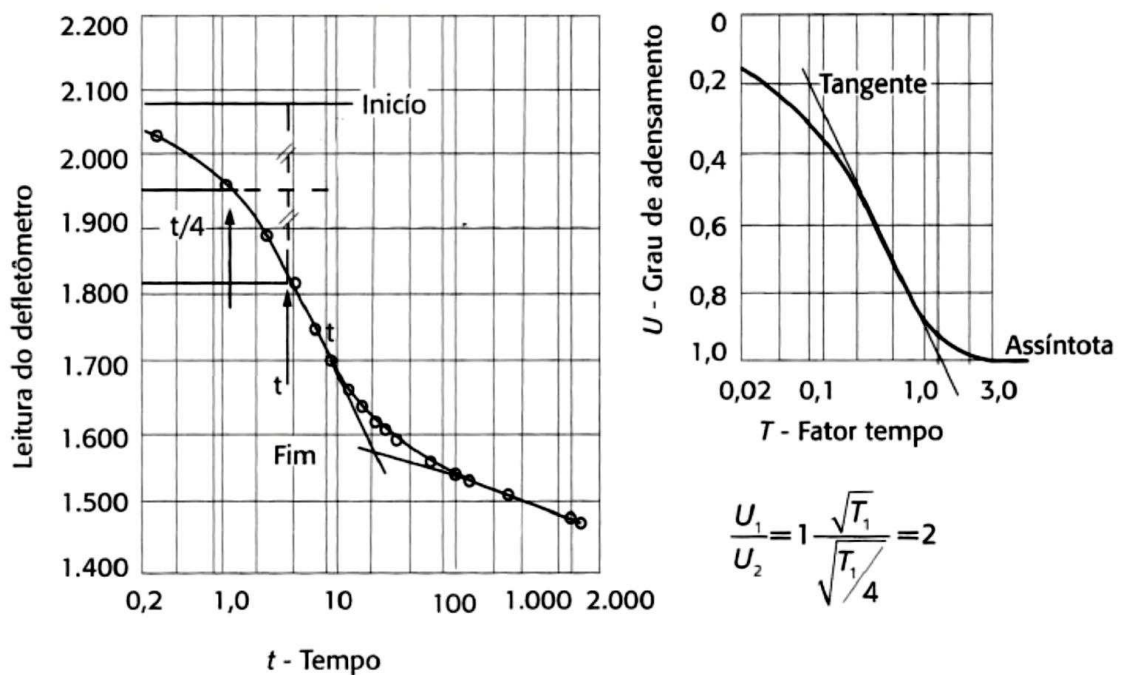
Em que:

H_d = distância de drenagem do corpo de prova;

t_{50} = tempo para ocorrência de 50% do adensamento primário.

Na Figura 8 é apresentada a construção gráfica referente ao método de Casagrande.

Figura 8: Método de Casagrande para a determinação do c_v



Fonte: MASSAD, 2016

- a) Método de Taylor: também é feito um ajuste da curva por um único ponto, o qual corresponde a 90% do adensamento primário, conforme indicado na Equação 3:

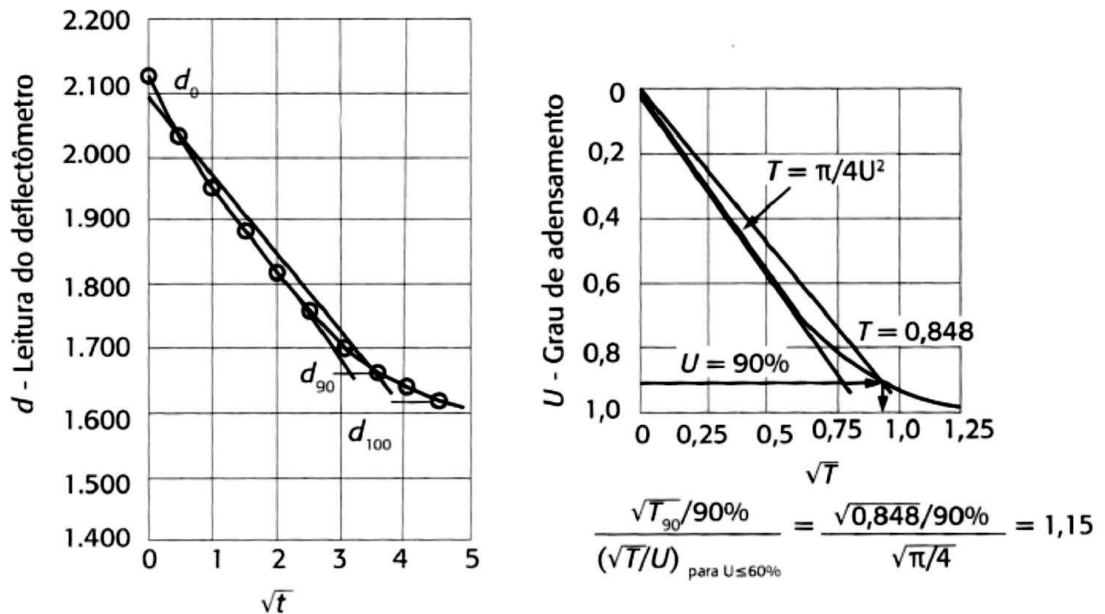
$$c_v = \frac{H_d^2 \times 0,848}{t_{90}} \quad (3)$$

Em que:

t_{90} = tempo para ocorrência de 90% do adensamento primário.

A Figura 9 apresenta a construção gráfica referente ao método de Taylor.

Figura 9: Método de Taylor na determinação do c_v



Fonte: MASSAD, 2016.

A realização do ensaio de adensamento unidimensional permite o cálculo de diversos índices e parâmetros de compressibilidade do solo, sendo que alguns dos quais são apresentados nas equações de 4 a 11 (CARVALHO, 1989).

a) Módulo edométrico (D):

$$D = \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\varepsilon_v} - 1 \quad (4)$$

Em que:

$\Delta\sigma'_v$ = variação da tensão vertical efetiva

$\Delta\varepsilon_v$ = variação da deformação específica vertical

b) Índice de vazios inicial do ensaio (e_i):

$$e_i = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (5)$$

Em que:

γ_s = peso específico das partículas sólidas

γ_d = peso específico seco

c) Coeficiente de compressibilidade (a_v):

$$a_v = - \frac{\Delta e}{\Delta\sigma'_v} \quad (6)$$

Em que:

Δe = variação do índice de vazios

$\Delta\sigma'_v$ = variação da tensão vertical efetiva

d) Coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v):

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_i} \quad (7)$$

- e) Índice de recompressão (C_r): também é obtido a partir do gráfico e versus $\log \sigma'_v$, no trecho que antecede a tensão de pré-adensamento, ou seja, o de recompressão.

$$C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (8)$$

- f) Relação de compressão (CR):

$$CR = \frac{C_c}{1 + e_i} \quad (9)$$

- g) Relação de recompressão (RR):

$$RR = \frac{C_r}{1 + e_i} \quad (10)$$

- h) Coeficiente de condutividade hidráulica (k):

$$k = \frac{c_v \cdot a_v \cdot \gamma_w}{1 + e_m} \quad (11)$$

Em que:

e_m = índice de vazios médio

γ_w = peso específico da água

2.3 O ENSAIO DE ADENSAMENTO COM TAXA DE DEFORMAÇÃO CONSTANTE – CRS

2.3.1 Considerações Iniciais

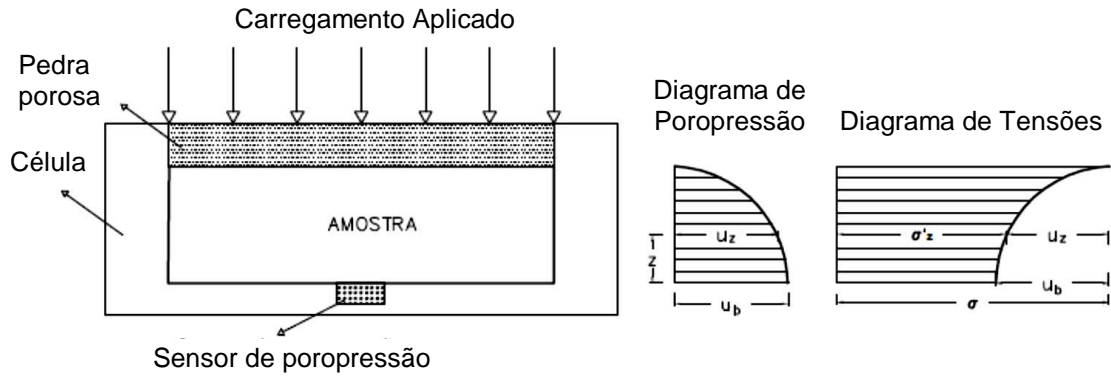
O ensaio de adensamento com taxa de deformação constante (CRS) oferece uma forma rápida de se obter os parâmetros de adensamento do solo, quando comparado com o ensaio de adensamento incremental. Além disso, o CRS também permite a utilização de um método direto para a determinação da condutividade hidráulica do solo (ADAMS, 2011).

Para a realização do ensaio, uma das faces do corpo de prova é mantida fixa enquanto na outra é imposto o deslocamento com velocidade constante, implicando em um carregamento constante com o tempo. O equipamento simples, normalmente, é encontrado em qualquer laboratório de mecânica dos solos, sendo necessária apenas uma célula onde é colocado o corpo de prova e um pistão para a aplicação da carga. A possibilidade de automatizar todo o processo é uma vantagem forte do ensaio (LIMA, 1996).

A simplicidade do mecanismo de transferência de força do sistema para o corpo de prova tem feito do CRS o método mais aplicado entre todas as possibilidades de ensaio de adensamento com carregamento contínuo. O ensaio consiste em aplicar um carregamento vertical com velocidade constante de deformação ao corpo de prova. Normalmente, apenas no topo da célula é permitida a drenagem, pois na parte inferior procedem-se às medições de poropressão. A tensão efetiva média pode ser determinada em qualquer instante do ensaio considerando uma distribuição parabólica para o excesso de poropressão (VITOR, 2012). Na Figura 10 é apresentado um esquema do ensaio CRS.

Durante o ensaio são realizadas as leituras referentes aos dados de interesse, os quais serão utilizados para a obtenção dos parâmetros do ensaio, conforme apresentado na Tabela 1 (MONTEMEZZO, 2005).

Figura 10: Esquema geral do ensaio CRS



Fonte: Adaptado de MOURA, 2004.

Tabela 1: Dados obtidos a partir das leituras realizadas no ensaio CRS

LEITURAS	VARIÁVEL	UNIDADE
Tempo	t	segundos
Força	F	kgf
Deslocamento vertical	Δh	mm
Poropressão na base	u_b	kPa

Fonte: Adaptado MONTEMEZZO, 2005

Segundo Gonzalez (2000), o ensaio CRS possui uma série de vantagens quando comparado com ensaio de adensamento incremental: (a) os métodos de realização do ensaio e captação dos dados são relativamente simples e passíveis de serem automatizados; (b) as leituras realizadas de forma contínua fornecem mais valores que favorecem a determinação dos parâmetros; (c) tem-se a possibilidade de obtenção dos dados de forma mais simples e precisa; (d) o ensaio é bem mais rápido que o ensaio incremental, sendo que mesmo com uma taxa de fluxo menor no CRS, o tempo de ensaio é menor, uma vez que não se “perde” tanto tempo no adensamento secundário; (e) pode ser utilizada a contrapressão.

Porém, o ensaio CRS também apresenta desvantagens, podendo-se citar que os valores da compressão secundária não podem ser determinados facilmente e as poropressões geradas dependem da taxa de deformação adotada (GONZALEZ, 2000).

2.3.2 Determinação da Velocidade de Ensaio

A escolha adequada da velocidade de aplicação do carregamento vertical é um dos mais importantes aspectos do ensaio CRS. A norma D 4186 (ASTM, 1998) sugere limitar a razão entre a poropressão na base da amostra e a tensão vertical (u_b/σ_v) em 30% e desta forma, estabelece que a velocidade de ensaio deva ser adotada baseando-se no limite de liquidez (LL) dos solos, como apresentado na Tabela 2.

Entretanto, existem várias referências que contradizem este valor limite. De forma mais conservadora, Carvalho *et al.* (1993) recomendam os valores limites de u_b/σ_v entre 2 a 5%, conforme recomendação de Wissa *et al* (1971).

Tabela 2: Recomendação da norma ASTM D 4186 para velocidades de deformação

Limite de Liquidez (LL) (%)	Velocidade de deformação (%/min)
< 40	0,04
40 a 60	0,01
60 a 80	0,004
80 a 100	0,001
100 a 120	0,0004
120 a 140	0,00001

Fonte: ASTM, 1998.

Por outro lado, Smith e Wahls (1969) concluíram que para valores de $u_b/\sigma_v < 50\%$, haverá uma boa concordância entre os resultados de ensaios CRS e de ensaios edométricos incrementais. Estes mesmos autores recomendam

velocidades de deformação variando desde 0.24 %/min a 0.0024 %/min para corpos de prova de 25 mm de espessura. Desta forma, os ensaios CRS teriam uma duração média variando desde cerca de 1,2 horas até 48 horas.

A Tabela 3 apresenta um resumo de critérios e valores para a razão u_b/σ_v existentes na literatura.

Tabela 3: Recomendações para a razão u_b/σ_v

AUTOR	RAZÃO u_b/σ_v
Smith e Wahls (1969)	< 50%
Armours e Drnevich (1986)	40% a 50%
Gorman et al. (1978)	30% a 50%
Carvalho et al. (1993)	< 30%
D4186 (ASTM, 1989)	<30%
Larsson e Sällfors (1986)	< 15%
Sandbraekken et al. (1986)	5% a 10%
Wissa et al. (1971)	2% a 5%

Fonte: Adaptado de MOURA, 2004.

Carvalho *et al.* (1993) sugerem como hipótese que as deformações são infinitesimais e que k e m_v são constantes. Assim fazem uma proposição, baseada na comparação entre o ensaio CRS e o convencional, sugerindo que se adote para o ensaio CRS a mesma velocidade com que o topo da amostra se movimenta no ensaio de adensamento com carregamento incremental.

Nas tabelas 4 e 5 são apresentados alguns valores de velocidade utilizados por Carvalho (1989) e por Spannenberg (2003), respectivamente, bem como o tempo de duração de alguns dos ensaios.

Tabela 4: Velocidades de ensaio CRS utilizadas nos ensaios de Carvalho (1989)

ENSAIO	PROF. (m)	VELOCIDADE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (s⁻¹)	DURAÇÃO DO ENSAIO (horas)
CRS-3	4,0 – 4,5	$5,3 \times 10^{-6}$	25
CRS-5	3,0 – 3,5	$5,3 \times 10^{-6}$	31
CRS-6	3,0 – 3,5	$5,3 \times 10^{-6}$	31
CRS-7	5,0 – 5,5	$5,3 \times 10^{-6}$	31
CRS-8	5,0 – 5,5	$2,0 \times 10^{-6}$	79
CRS-9	5,0 – 5,5	$1,0 \times 10^{-6}$	16

Fonte: CARVALHO, 1989.

Tabela 5: Velocidades de ensaio CRS utilizadas nos ensaios de Spannenberg (2003)

ENSAIO Nº	VELOCIDADE (mm/min)	VELOCIDADE DEFORMAÇÃO (s⁻¹)
CRS-01	0,082	$6,80 \times 10^{-5}$
CRS-02	0,035	$2,90 \times 10^{-5}$
CRS-03	0,007	$0,58 \times 10^{-5}$
CRS-04	0,007	$0,58 \times 10^{-5}$
CRS-05	0,002	$0,17 \times 10^{-5}$

Fonte: SPANNENBERG, 2003

2.3.3 Histórico

Carvalho (1989) elaborou uma revisão dos trabalhos realizados sobre o ensaio CRS até aquela época, distribuindo-os em ordem cronológica e apresentando suas principais contribuições:

- 1959: Hamilton e Crawford foram os pioneiros na execução deste ensaio, utilizaram-no para a avaliação dos recalques previstos e observados no leste do Canadá. Concluíram que para se obter um resultado semelhante

entre o ensaio de adensamento incremental e o CRS era necessário trabalhar em uma faixa de deformação baixa;

- 1964: Crawford introduziu novos argumentos ao estudo anterior, principalmente sobre os valores de deformação vertical que variavam de acordo com a espessura da camada do solo. Apresentou uma faixa de valores para a sobrepressão na base nos quais as curvas ficavam bem próximas;
- 1965: Crawford realizou o trabalho com uma relação entre a sobrepressão e a tensão vertical aplicada de 15%, chegando à conclusão de que a estrutura do solo desempenha um papel importante no adensamento, pois é quem rege a resistência variável com o tempo;
- 1965: Wahls e Degodoy trabalharam com amostras amolgadas e atingiram valores de sobrepressão na base de 25 a 75% da tensão vertical. Assim como já havia sido reportado anteriormente, também concluíram que a sobrepressão na base diminuía com o decréscimo da deformação vertical;
- 1969: Smith e Wahls afirmaram que a relação u_b/σ_v deve ser mantida em valores inferiores a 50%, pois para valores acima deste estipulado, não é possível assegurar uma distribuição uniforme da tensão efetiva ao longo do corpo de prova. Ainda mostraram que os gráficos Δe versus $\log \sigma'_v$ dos ensaios CRS e convencional ficaram bem semelhantes;
- 1971: Wissa *et al.* utilizaram em seu trabalho a argila azul de Boston e apresentaram um vasto estudo sobre o CRS. Para os parâmetros utilizados, observaram que as curvas e versus $\log \sigma'_v$ tiveram boa concordância com as encontradas no ensaio convencional e também verificaram que os valores do coeficiente de adensamento encontrados eram bem similares aos valores do ensaio de adensamento incremental com os métodos de Casagrande e Taylor. Também sugeriram que a relação entre u_b/σ_v não ultrapasse 5% para que os gradientes hidráulicos fossem pouco representativos;

- 1975: Sällfors trabalhou com a argila de Bäckebol e fixou uma faixa de trabalho para a deformação vertical. Inferiu que as tensões de sobreadensamento são diretamente proporcionais à deformação vertical. Além disso, mostraram que os ensaios de laboratório tiveram similaridade com os aferidos em ensaios de campo;
- 1978: Gorman *et al.* tentaram determinar a exequibilidade do ensaio CRS, utilizando uma vasta gama de solos com propriedades físicas distintas e concluíram que: (a) os valores de c_v tiveram boa concordância; (b) os valores de CR foram um pouco menores para valores de deformação menores; (c) a sobrepressão gerada na base não deve ser inferior a 7kPa e a relação u_b/σ_v deve ficar entre 30 e 50%;
- 1983: Leroueil *et al.* em seu estudo realizaram seis tipos de ensaios diferentes, entre eles o CRS e o convencional e tinha o intuito de analisar os valores das tensões de sobreadensamento. Os resultados apresentaram inconformidades com os estudos apresentados por Sällfors (1975). Mostraram que a tensão de sobreadensamento está relacionada com a deformação vertical;
- 1985: Leroueil *et al.* buscaram determinar um modelo reológico para o solo do leste do Canadá e realizaram diversos tipos de ensaios, inclusive o CRS. Para a variação da deformação específica imposta por eles não foi possível determinar as poropressões na base, pois eram muito pequenas. Também obtiveram resultados semelhantes aos de Crawford (1965), Sällfors (1975) e Leroueil *et al.* (1983);

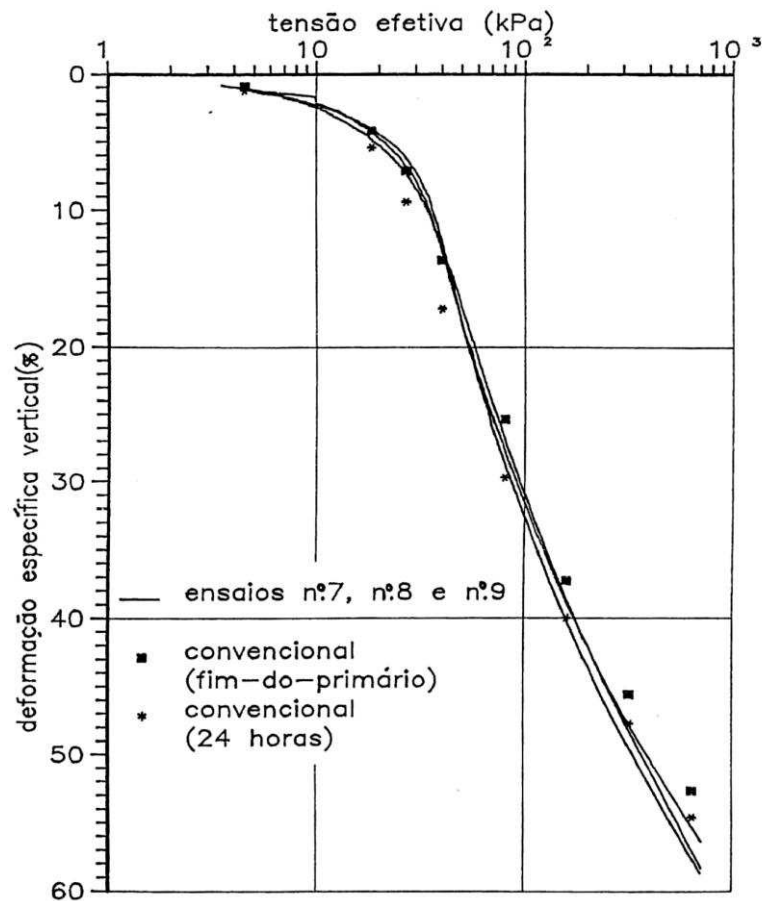
No Brasil, os estudos sobre o ensaio de adensamento com deformação constante começaram no final da década 80, quando o Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal do Rio de Janeiro adquiriu um equipamento da marca *Tricon* (MONTEMEZZO, 2005).

Carvalho (1989) realizou uma série de ensaios convencionais com o novo equipamento de CRS. A velocidade utilizada para a execução do ensaio com deformação controlada fez com que eles durassem de 16 a 79 horas, além

de não ter utilizado a contrapressão, pois considerava o solo saturado e também porque buscava uma comparação com o ensaio convencional. Ele manteve a razão de u_b/σ_v dos ensaios entre 10 e 32%, sendo capaz de concluir que não ocorreram discrepâncias entre estes e o convencional. A Figura 11 mostra esta comparação.

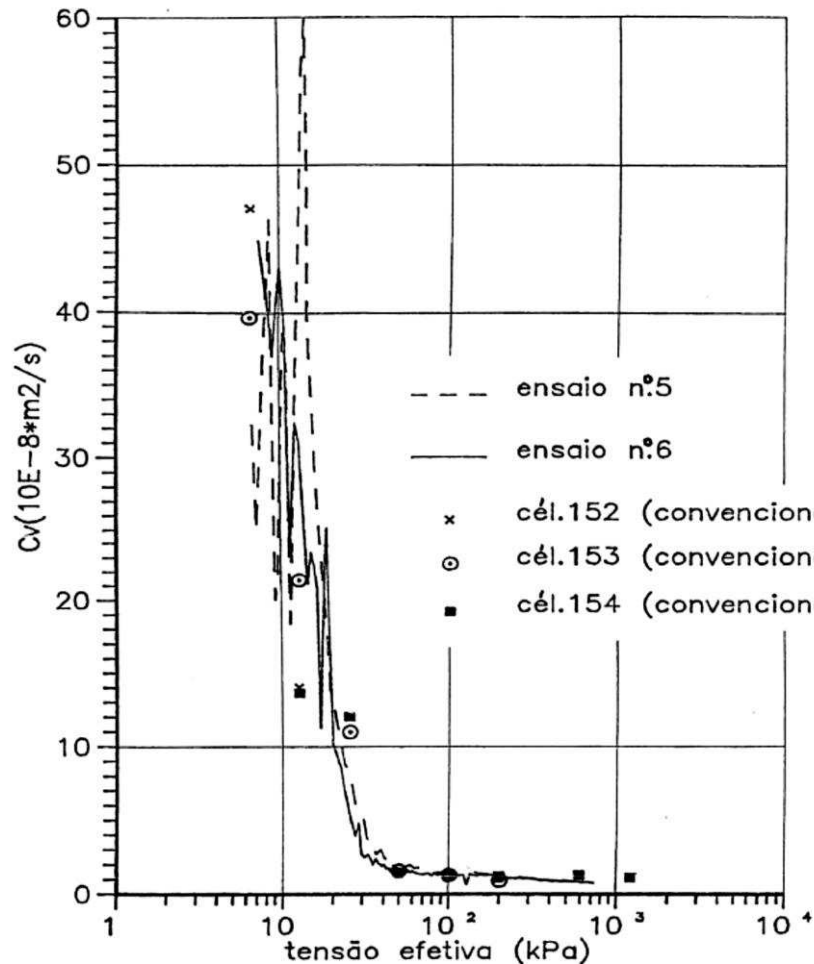
Da mesma forma, as tensões de pré-adensamento, segundo o método de Casagrande, para o ensaio de adensamento incremental e o CRS tiveram valores com dispersões aceitáveis. O coeficiente de adensamento, que foi no obtido no ensaio convencional e no ensaio CRS, quando calculado no trecho normalmente adensado eram bem semelhantes, o que não ocorreu quando era calculado na faixa pré-adensada (CARVALHO, 1989). A Figura 12 exemplifica estas similaridades e dispersões do coeficiente de adensamento.

Figura 11: Comparação entre curvas do ensaio convencional e do ensaio CRS



Fonte: CARVALHO, 1989.

Figura 12: Comparação entre o c_v do ensaio convencional e do ensaio CRS



Fonte: CARVALHO, 1989.

Segundo Montemezzo (2005), nos anos seguintes os estudos com o ensaio de adensamento com taxa de deformação constante foram continuados por:

- 1996: Sheahan e Watters realizaram seis ensaios CRS com uma célula Rowe na argila azul de Boston, sendo que os ensaios tiveram uma média de duração de 11 horas e a razão u_b/σ_v não ultrapassou o limite máximo de 22%. A comparação com ensaios convencionais mostrou que, tanto a tensão de pré-adensamento quanto às curvas de deformação versus tensão vertical efetiva apresentaram resultados similares nos dois tipos de ensaio. Eles inferiram que a condição transiente do solo foi a responsável pela dispersão dos valores de c_v , quando calculados abaixo da tensão de pré-adensamento;

- 1997: Alborta elaborou ensaios de CRS para verificar os resultados obtidos quando alguns fatores relevantes são modificados: variação da velocidade de deformação e aplicação ou não de contrapressão. Concluiu que a alteração da velocidade, dentro dos valores utilizados, não gerou discrepância em relação aos ensaios convencionais. Inferiu que quando a tensão de pré-adensamento é ultrapassada os valores do módulo edométrico convergem para os do ensaio incremental. Também conclui que a razão u_b/σ_v recomendada pela norma americana é muito conservadora e que a velocidade do ensaio não pode ser nem muito alta e nem muito baixa, pois nos dois casos os resultados podem ser comprometidos;
- 1998: Baptista notou que no início dos ensaios de CRS ocorrem altos valores de c_v devido, principalmente, a diminuição da poropressão por causa de um fluxo de água transiente. Ele apresentou resultados que mostram a tendência de semelhança entre o ensaio convencional e o CRS para valores de tensão vertical acima da tensão de pré-adensamento;
- 1999: Kassin e Clarke buscaram comparar o ensaio CRS com o convencional para validar um equipamento, utilizando para isso um solo melhorado com cal. Trabalharam com velocidades de ensaios relativamente altas, não ultrapassando três horas e obtiveram valores para a relação u_b/σ_v menores que 10%. Concluíram que o equipamento funcionava corretamente, pois os resultados foram bem similares;
- 2002: Leroueil e Hight demonstraram que a curva de e_v versus $\log \sigma'_v$ depende diretamente da velocidade imposta no ensaio, assim como o valor da tensão de pré-adensamento obtido no mesmo gráfico.

Spannenberg (2003), ao comparar resultados de ensaios de adensamento incremental (SIC) e ensaios CRS em uma argila proveniente da área para implantação da indústria Rio Polímeros, em Duque de Caxias, Baixada Fluminense, obteve os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de tensão de pré-adensamento e OCR

Ensaio nº	σ'_{vm} (kPa)	OCR	Velocidade (mm/min)
SIC-01	35	1,40	0,002
SIC-02	35	1,40	0,002
CRS-01	55	2,20	0,082
CRS-02	38	1,52	0,035
CRS-03	40	1,25	0,007
CRS-04	7	0,22	0,007
CRS-05	42	1,47	0,002

Fonte: SPANNENBERG, 2003.

Segundo a autora, as diferenças nos valores de OCR dos ensaios CRS podem ser atribuídas às diferentes velocidades de deformação, sendo que esta influência só foi significativa no ensaio mais rápido (CRS-01), pois os demais resultaram em OCR aproximadamente igual a 1,5. O baixo valor obtido no ensaio CRS-04 foi atribuído ao amolgamento da amostra. Foi observado também que o ensaio mais lento (CRS-05) foi o que resultou em valor de OCR mais próximo dos encontrados nos ensaios SIC (1,47 e 1,40 respectivamente), cujas velocidades estimadas foram idênticas à do ensaio CRS-05.

Com relação às análises da influência da velocidade de deformação nos valores de k , m_v e c_v , Spannenber (2005) concluiu que os mesmos sofrem redução quando o ensaio é mais lento. Por outro lado, a velocidade de deformação tende a apresentar menor influência sobre os resultados do ensaio de adensamento para maiores valores de σ'_v .

Moura (2004) realizou diversos ensaios de adensamento para comparação entre resultados do ensaio CRS e do incremental. Para as velocidades escolhidas e a relação entre u_b/σ_v por volta dos 40%, as curvas de índice de vazios versus tensão vertical efetiva ficaram similares para o trecho de compressão virgem, diferente do trecho de recompressão. A tensão de pré-adensamento teve valores maiores quando calculada pelo ensaio CRS. O autor concluiu que: a razão u_b/σ_v depende muito da velocidade de ensaio; a velocidade utilizada pode modificar

alguns parâmetros do solo e, para que o cálculo do c_v possa ser confiável, é necessário ter um transdutor de poropressão com boa precisão.

Além dos trabalhos apresentados, podem ser citados: Montemezzo (2005), que realizou um estudo comparativo entre argilas e areias usando o CRS e Vieira (2006) que desenvolveu um equipamento para a realizar ensaios CRS em solos não saturados e artificialmente cimentados.

Vitor (2012) desenvolveu três campanhas de ensaios convencional e CRS com o intuito de proceder à montagem e calibração de um equipamento. Várias conclusões foram obtidas, dentre as quais valem ressaltar: uma pequena variação na velocidade de ensaio provocou uma significativa variação na poropressão; as tensões de pré-adensamento, em geral, foram mais elevadas no ensaio CRS e os parâmetros de adensamento foram bem próximos nos dois tipos.

2.3.4 Parâmetros de Adensamento no ensaio CRS

Para interpretação dos dados obtidos no ensaio de adensamento com taxa de deformação constante existem diversos métodos disponíveis na literatura. Entre eles podem ser citados os dois que serão objeto de estudo deste trabalho: o método de Smith e Wahls (1969) que considera desprezível o efeito do peso próprio do material no adensamento e supõe deformações infinitesimais; e o método de Wissa *et al.* (1971), que supõem deformações infinitesimais, não consideram o efeito do peso próprio e admitem que a permeabilidade e o coeficiente de compressibilidade são constantes (GUIMARÃES FILHO, 1990).

Segundo Gonzales (2000), os parâmetros calculados a partir do ensaio, como tensão efetiva média (σ'_v), índice de vazios (e), coeficiente de adensamento (c_v) e condutividade hidráulica (k) apresentam certas variações dependendo do método utilizado, ou seja, a teoria linear de Smith e Wahls (1969) ou a teoria não linear de Wissa *et al.* (1971).

2.3.4.1 Teoria linear de Smith e Wahls (1969)

Segundo Gonzalez (2000), a teoria de Smith e Wahls (1969) para a equação governante do adensamento com taxa constante de deformação possui similaridade com a teoria de Terzaghi. A solução utilizada deve ser aplicada apenas quando a condição estacionária estiver estabelecida. Os autores se basearam em algumas das hipóteses de Terzaghi, como:

(a) o solo é homogêneo e saturado;

(b) tanto a água quanto as partículas sólidas são incompressíveis diante do esqueleto do solo;

(c) é válida a lei de Darcy;

(d) o solo é lateralmente confinado e a drenagem ocorre somente na vertical;

(e) tensões efetivas e tensões totais são constantes em uma mesma seção horizontal, porém variam ao longo da altura.

Baseado na continuidade do fluxo através de um elemento de solo, a equação básica do adensamento pode ser apresentada conforme a Equação 12:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{1}{1+e} \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \quad (12)$$

Em que:

z = coordenada vertical

k = condutividade hidráulica

γ_w = peso específico da água

u = excesso de poropressão

t = tempo

e = índice de vazios

A Equação 12 pode ser simplificada pela suposição de que a condutividade hidráulica é função do índice de vazios médio (e_m) e do tempo, não importando a posição. Também é suposto pelos autores que as deformações são infinitesimais por ser a variação do índice de vazios com o tempo muito pequena. Sendo a velocidade de deformação constante e não existindo deformação lateral, implica que $\partial e/\partial t$ é constante. A expressão final para o excesso de poropressão na base é apresentada na Equação 13:

$$\Delta u_b = \frac{\gamma_w \cdot s \cdot H^2}{k(1 - e_m)} \left[\frac{1}{2} - \frac{b}{s} \cdot \left(\frac{1}{12} \right) \right] \quad (13)$$

Em que:

Δu_b = excesso de poropressão na base

s = taxa de variação do índice de vazios médio ($\Delta e_m/\Delta t$)

H = altura do corpo de prova

b = constante que depende da variação do índice de vazios com a profundidade e o tempo

b/s = relação adimensional que indica a variação do índice de vazios com a profundidade

Com base nos dados medidos no ensaio de CRS, os autores desenvolveram a Equação 14 que apresenta o valor da tensão efetiva média.

$$\sigma'_v = \sigma_v - \alpha \cdot \Delta u_b \quad (14)$$

Em que:

σ'_v = tensão vertical efetiva média

α = relação entre poropressão média (u_m) e a poropressão na base (Δu_b)

Segundo Gonzalez (2000), Wahls e De Godoy (1965) perceberam que no ensaio incremental o valor de a iniciava em 1,0 e após um período de tempo alcançava um valor fixo de 0,63. Assim, os autores assumiram que o valor de a começava em $2/3$ e gradualmente caía para 0,64 quando as tensões cresciam gradativamente com o tempo. A Tabela 7 apresenta a variação de a com relação adimensional b/s .

Tabela 7: Variação de α em função da relação b/s

b/s	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0
a	0,667	0,682	0,700	0,722	0,750

Fonte: SMITH e WAHLS (1969) apud GONZALEZ (2000)

Considerando a expressão do coeficiente de adensamento definida por Terzaghi, apresentada na Equação 15,

$$c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} = \frac{k(1 + e)}{a_v \cdot \gamma_w} \quad (15)$$

Em que:

a_v = coeficiente de compressibilidade ($-\Delta e/\Delta \sigma'_v$)

m_v = coeficiente de compressibilidade volumétrica ($\Delta e/\Delta \sigma'_v$)

pode-se isolar e substituir a expressão de k na Equação 13, obtendo-se a Equação 16 para o coeficiente de adensamento.

$$c_v = \frac{s \cdot H^2}{a_v \cdot \Delta u_b} \left[\frac{1}{2} - \frac{b}{s} \cdot \left(\frac{1}{12} \right) \right] \quad (16)$$

Uma questão com relação às equações anteriores é que a taxa de deformação viscosa nas argilas varia com diferentes tipos de solos. Por conta disso, ao invés de apresentar uma faixa de trabalho para a deformação ou um limite crítico onde a teoria não é mais válida, Smith e Walls limitaram o ensaio especificando uma relação entre a sobrepressão gerada e a tensão total, conforme apresentado na Tabela 3 (GONZALEZ, 2000).

2.3.4.2 Teoria linear de Wissa *et al.* (1971)

Segundo Gonzalez (2000), Wissa *et al.* (1971) desenvolveram uma solução mais completa, que consiste de uma fase inicial transiente e de uma fase final em regime estacionário, baseados nas seguintes hipóteses:

- (a) existem deformações infinitesimais;
- (b) o coeficiente de adensamento é constante independente da condutividade hidráulica (k) e do coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v);
- (c) a deformação e o fluxo só ocorrem na direção vertical;
- (d) tanto a água quanto as partículas sólidas são incompressíveis em relação ao esqueleto do solo;
- (e) o solo está completamente saturado.

Resolvendo a equação não linear da teoria do adensamento os autores desenvolveram a expressão da deformação ao longo do corpo de prova. As soluções podem ser utilizadas para obter as expressões para a tensão efetiva média (σ'_v), o coeficiente de adensamento (c_v) e a condutividade hidráulica (k), tanto para relações tensão-deformação lineares e não lineares. Estes autores também adotaram a relação u_b/σ_v como parâmetro para selecionar a velocidade adequada para o ensaio. A Equação 17 apresenta a equação governante do adensamento, utilizada por Wissa *et al.* (1971).

$$c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (17)$$

Em que:

ε = deformação vertical

A solução fornece a deformação como uma função do fator tempo T_v e de uma variável adimensional de espaço, X , conforme apresentada na Equação 18.

$$\varepsilon(X, T_v) = rt[1 + F(X, T_v)] \quad (18)$$

Em que:

X = variável espacial adimensional = z/H ; $z = 0$ no topo e $z = H$ na base do corpo de prova;

$$r = \text{taxa de deformação, } r = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \quad (19)$$

T_v = fator tempo (Equação 22)

$$F(X, T_v) = \frac{1}{6T_v} \cdot (2 - 6X + 3X^2) - \frac{2}{\pi^2 T_v} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n \cdot \pi \cdot X}{n^2} \exp(-n^2 \cdot \pi^2 \cdot T_v) \quad (20)$$

Segundo Gonzalez (2000), as duas componentes da deformação (Equação 20) auxiliam no entendimento do que acontece durante o ensaio. A primeira parte da equação representa a deformação média imposta ao corpo de prova, como se as deformações fossem as mesmas ao longo do mesmo. A segunda parte (F), representada pela Equação 20, também se divide em duas partes. A primeira representa o desvio em relação à deformação média no estado estacionário, que é independente do tempo. Este desvio precisa existir para haver o gradiente hidráulico necessário para um fluxo constante do fluido dos poros do solo. O segundo termo na Equação 20 é a parte transiente da solução e descreve o decaimento do desequilíbrio provocado no início do ensaio.

Wissa *et al.* (1971), desenvolveram e simplificaram a teoria linear de Smith e Wahls (1969). Eles mostraram que quando $T_v < 0,5$ está ocorrendo o estado transiente e que quando $T_v > 0,5$ já houve dissipação da condição transiente e se encontra no estado estacionário. Nos estágios iniciais do carregamento, onde a componente transiente da Equação 20 é significativa, o valor de T_v pode ser obtido utilizando uma função F_3 , a qual em um tempo t qualquer é dada pela Equação (21) (GONZALEZ, 2000).

$$F_3 = \frac{(\sigma_v - \Delta u_b) \sigma_{v,(t=0)}}{\sigma_v - \sigma_{v,(t=0)}} \quad (21)$$

Como a relação entre T_v e F_3 não é linear, pode-se usar um processo iterativo ou um gráfico de T_v versus F_3 para determinar T_v . Após a obtenção do valor de T_v , caso tenha-se $T_v < 0,5$, pode-se determinar o valor do coeficiente de adensamento a partir da Equação 25, e então usar a Equação 11 para determinar a condutividade hidráulica (k) e a Equação 23 para calcular a tensão vertical efetiva (GONZALEZ, 2000).

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{H^2} \quad (22)$$

Uma vez estabelecida à condição estacionária do fluxo ($T_v \geq 0,5$ ou $F_3 > 0,4$), pode-se determinar a tensão vertical efetiva segundo a Equação 23.

$$\sigma'_v = \bar{\sigma}_v - \frac{2}{3} \cdot \bar{u}_b \quad (23)$$

Em que:

$\bar{\sigma}_v$ = tensão vertical total média aplicada no corpo de prova, que em um dado tempo é igual a $\sigma_v - u_b$;

\bar{u}_b = é a poropressão média na face drenada (ou a contrapressão aplicada)

Se na equação de Smith e Wahls (1969), referente ao excesso de poropressão na base do corpo de prova (Equação 13), for assumido que $b/s = 0$ e for substituído s (taxa de alteração do índice de vazios) por r (taxa de deformação), obtém a Equação 24 para cálculo da condutividade hidráulica, k .

$$k = \frac{r \cdot H^2 \cdot \gamma_w}{2 \cdot \Delta u_b} \quad (24)$$

O coeficiente de adensamento pode ser obtido a partir da Equação 25.

$$c_v = \frac{\bar{H}^2}{2 \cdot u_b} \left(\frac{\Delta \sigma_v}{\Delta t} \right) \quad (25)$$

2.3.4.3 Teoria não linear de Wissa *et al.* (1971)

Segundo Gonzalez (2000), a solução para este caso é baseada na teoria do adensamento não linear de Davis e Raymond (1965). Assim como na teoria linear, a solução possui uma condição transiente e outra estacionária, sendo que a transição entre essas duas não depende da taxa de deformação. Para um material não linear a deformação será proporcional à variação do logaritmo da tensão efetiva, sendo que para um determinado tempo t pode ser definida a função F_3 conforme apresentada na Equação 26.

$$F_3 = \frac{\log(\sigma_v - \Delta u_b) - \log(\sigma_{v,(t=0)})}{\sigma_v - \log(\sigma_{v,(t=0)})} \quad \text{Equação 26}$$

Novamente, a função F_3 não é linear em relação a T_v , devendo ser usada uma técnica iterativa ou um gráfico de F_3 versus T_v . Sheahan *et al.* (1997 apud GONZALES, 2000) usou análise de regressão em um gráfico apresentado por Wissa *et al.* (1971) e obteve a Equação 27 para cálculo de T_v .

$$T_v = 4,78 \cdot F_3^3 - 3,21 \cdot F_3^2 + 1,65 \cdot F_3 + 0,0356 \quad (27)$$

Para valores de $T_v < 0,5$ pode-se calcular o coeficiente de adensamento pela Equação 25 e a condutividade hidráulica através da Equação 11 usando o coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v) não linear apresentado na Equação 30. Já para a determinação da tensão vertical efetiva média, utiliza-se a Equação 28. Porém, se o valor de $T_v \geq 0,5$, pode-se assumir uma condição de regime estacionário, e desta forma o coeficiente de adensamento obedece a Equação 29 e a condutividade hidráulica a Equação 31. A tensão vertical efetiva média continua sendo calculada pela Equação 28.

$$\sigma'_v = (\sigma_v^3 - 2 \cdot \sigma_v^2 \cdot \Delta u_b + \sigma_v \cdot \Delta u_b^2)^{\frac{1}{3}} \quad (28)$$

$$c_v = \frac{H^2 \cdot \log \left[\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}} \right]}{2 \cdot \Delta t \cdot \log \left[1 - \frac{\Delta u_b}{\sigma_v} \right]} \quad (29)$$

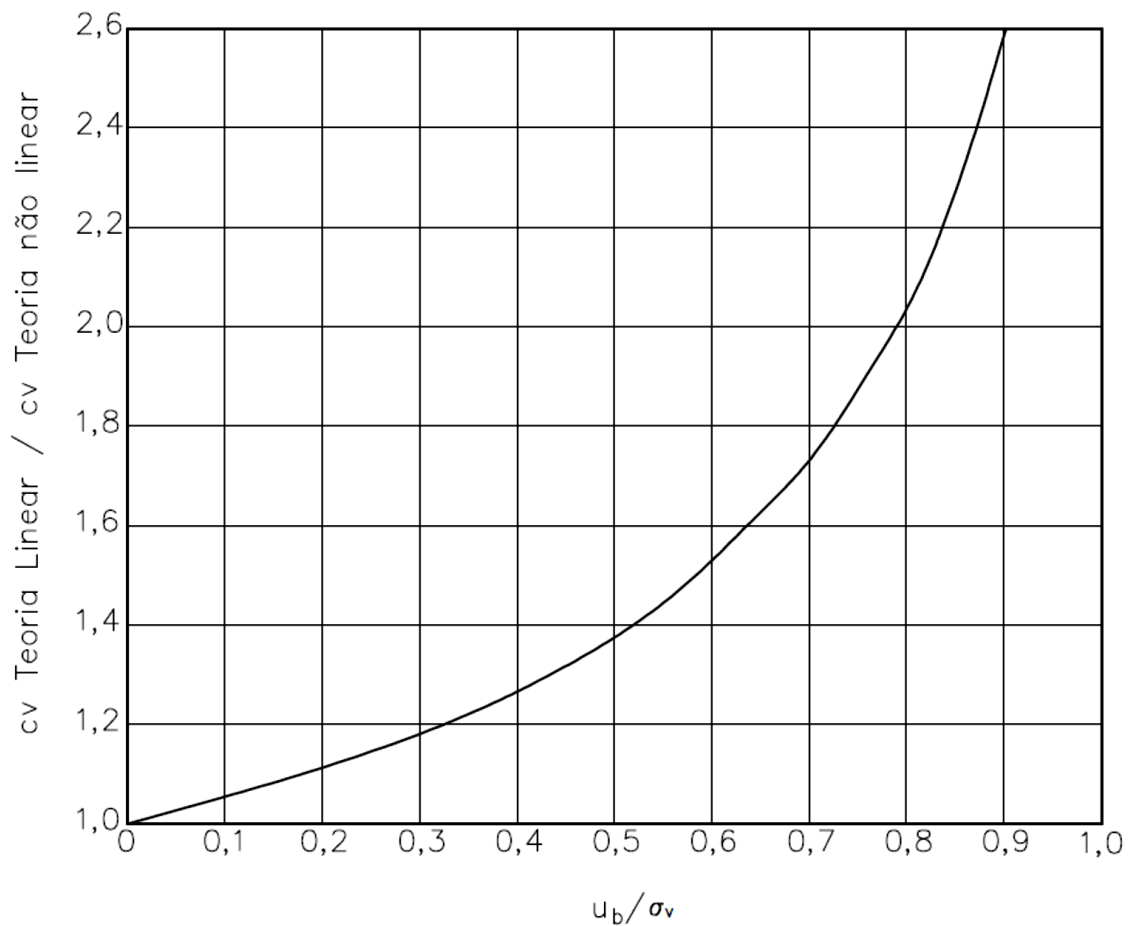
Isolando a condutividade hidráulica (k) na Equação 15, substituindo o coeficiente de adensamento (c_v) da Equação 29 e o módulo de compressibilidade volumétrica (m_v) da Equação 30, obtém-se a condutividade hidráulica apresentada na Equação 31.

$$m_v = \frac{0,434 \cdot r \cdot \Delta t}{\sigma_v \cdot \log \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)} \quad (30)$$

$$k = \frac{0,434 \cdot r \cdot H^2 \cdot \gamma_w \cdot \Delta t}{2 \cdot \sigma_v \cdot \log \left[1 - \frac{\Delta u_b}{\sigma_v} \right]} \quad (31)$$

Quando a relação u_b/σ_v for relativamente pequena, as expressões obtidas considerando diferentes relações tensão-deformação são muito similares, porém, elas começam a divergir quando a relação u_b/σ_v aumenta. Na Figura 13 é ilustrada a relação entre valores de c_v calculados pelas teorias linear e não linear, na medida em que ocorre o aumento da relação u_b/σ_v . Conforme mostrado nesta figura, quanto maior a relação u_b/σ_v , mais distantes ficam os valores de c_v calculados pelas duas teorias.

Figura 13: Comparação entre o coeficiente de adensamento calculado pela teoria linear e pela teoria não linear



Fonte: WISSA *et al.*, 1971 apud GONZALEZ, 2000.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para realizar a interpretação dos dados obtidos no ensaio CRS, neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta computacional, denominada de AnáliseCRS, cujos critérios para o seu desenvolvimento, ambiente de programação utilizado e formulações adotadas são descritos nas próximas seções.

3.1.1 Características gerais da Ferramenta Computacional

O AnáliseCRS tem como principal objetivo agilizar o processo de cálculo dos parâmetros do adensamento a partir de dados obtidos no ensaio CRS. Como resultados, o programa grava os dados do ensaio e os resultados do processamento em um arquivo de planilha eletrônica, além de apresentar diversos gráficos com os parâmetros calculados.

O programa foi desenvolvido dentro do ambiente de programação Matlab[®], que é uma linguagem de alto-nível, com um grande número de bibliotecas de funções pré-definidas, além de ser um ambiente amigável e com muitas funcionalidades gráficas para a visualização de dados. Por esses e outros recursos, o Matlab[®] tem sido largamente utilizado em universidades, centros de pesquisa e diversos órgãos científicos e governamentais em inúmeros países do mundo.

No desenvolvimento do programa para este trabalho buscou-se construir uma interface simples e amigável, porém, com os recursos necessários para a entrada de informações iniciais e a leitura do arquivo de dados dos ensaios. Além disso, existe a opção de escolha dos métodos de análise pelo usuário, bem como recursos para a visualização de resultados dos ensaios já processados e salvamento dos mesmos em um arquivo.

3.1.2 Formulações Utilizadas e Cálculos Executados

Como informações para efetuar o processamento, o programa dispõe dos dados obtidos do arquivo gerado durante a execução do ensaio CRS, do método de cálculo escolhido pelo usuário e das informações iniciais do ensaio que consistem: na altura inicial do corpo de prova (H_0), na contrapressão utilizada no ensaio (C_p) e no índice de vazios inicial do corpo de prova (e_0).

Após a obtenção de todos os dados, o programa inicia os cálculos utilizando a Equação 32 para determinar a relação u_b/σ_v . Conforme apresentado na seção 2.3.2 (Tabela 3), esta relação é utilizada por diversos autores como parâmetro para avaliar se a velocidade do ensaio CRS executado foi adequada.

$$\text{detv} = \frac{u_b}{\sigma_v} \quad (32)$$

A altura do corpo prova em qualquer instante do ensaio (H_i) é calculada conforme a Equação 33.

$$H_i = H_0 - \Delta h_i \quad (33)$$

Em que:

Δh_i = deslocamento do topo do corpo de prova desde o início do ensaio até um tempo t_i qualquer

A deformação vertical (ε_v) ao longo do ensaio é obtida por meio da Equação 34.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta h_i}{H_0} \times 100 \quad (34)$$

A poropressão gerada no corpo de prova ao longo do ensaio é determinada segundo a Equação 35.

$$PP = (u_{bi} - u_{b0}) + C_p \quad (35)$$

Em que:

u_{b0} = poropressão existente no corpo de prova no tempo zero (t_0)

u_{bi} = poropressão lida em um tempo qualquer (t_i)

O valor do índice de vazios do corpo de prova (e_i), em um tempo t_i qualquer desde o início do ensaio, é calculado conforme a Equação 36.

$$e = \left(\frac{1 + e_0}{H_0} \right) \cdot H_i - 1 \quad (36)$$

Após as etapas anteriores, o programa realiza os cálculos referentes ao método de análise escolhido, que consistem no método linear de Smith e Wahls (1969) e no método não linear de Wissa *et al.* (1971). A escolha para implementação computacional desses dois métodos foi baseada na grande utilização dos mesmos para a interpretação de ensaios CRS, bem como pelo fato de trabalharem com teorias diferentes (linear e não linear, respectivamente), possibilitando dessa forma fazer comparações entre os resultados obtidos com o emprego dos mesmos.

Para os métodos escolhidos são realizados os cálculos da tensão vertical efetiva média (σ'_v), do coeficiente de adensamento (c_v), do coeficiente de compressibilidade (a_v) e do coeficiente de condutividade hidráulica (k).

Para cálculo dos valores de σ'_v e de c_v , segundo o método linear de Smith e Wahls (1969), são utilizadas as equações 23 e 25, respectivamente, as quais são repetidas a seguir.

$$\sigma'_v = \bar{\sigma}_v - \frac{2}{3} \cdot \bar{u}_b \quad (37)$$

$$c_v = \frac{\bar{H}^2}{2 \cdot u_b} \left(\frac{\Delta\sigma_v}{\Delta t} \right) \quad (38)$$

No caso do método não linear de Wissa *et al.* (1971), são utilizadas as equações 28 e 29 para cálculo dos valores de σ'_v e de c_v , respectivamente.

$$\sigma'_v = (\sigma_v^3 - 2 \cdot \sigma_v^2 \cdot \Delta u_b + \sigma_v \cdot \Delta u_b^2)^{\frac{1}{3}} \quad (39)$$

$$c_v = \frac{H^2 \cdot \log \left[\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}} \right]}{2 \cdot \Delta t \cdot \log \left[1 - \frac{\Delta u_b}{\sigma_v} \right]} \quad (40)$$

Para ambos os métodos, o coeficiente de compressibilidade é determinado através da Equação 6 e o coeficiente de condutividade hidráulica pela Equação 11, repetidas a seguir.

$$a_v = - \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \quad (6)$$

$$k = \frac{c_v \cdot a_v \cdot \gamma_w}{1 + e_m} \quad (11)$$

3.1.3 Preparação dos Resultados

Após proceder aos cálculos referentes aos métodos de análise implementados, o programa AnáliseCRS faz uma filtragem e um refinamento dos resultados

obtidos, ou seja, elimina valores inconsistentes. Este procedimento é necessário, uma vez que sendo a captação dos dados contínua e a sensibilidade do equipamento de captação muito alta, podem ocorrer bruscas oscilações de valores nos parâmetros calculados, que não interessam no resultado final. Em alguns casos, o número de linhas de valores gerados é da ordem de 5000, sendo que após a filtragem dos dados essa quantidade cai para, aproximadamente, 2000 linhas de processamento.

A filtragem consiste em uma análise realizada em cada par de vetores de resultados que serão utilizados para gerar os gráficos. Por exemplo, para gerar o gráfico da tensão vertical efetiva x índice de vazios, o programa analisa linha a linha os valores da tensão vertical efetiva e elimina os valores negativos, sendo que cada valor subtraído no vetor da tensão vertical efetiva, também é eliminado o correspondente deste valor no vetor do índice de vazios. A análise é igualmente realizada no vetor do índice de vazios sendo procedida a eliminação dos valores negativos nos dois vetores. Desta forma, é feita a filtragem para todos os pares de vetores que geram um determinado gráfico.

Após a conclusão de todo o processo de cálculo, passe-se à fase de combinação dos resultados obtidos para a apresentação dos gráficos de interesse. Podem ser gerados até quinze tipos de gráficos como resultado da análise dos dados, os quais são divididos em três grupos: teoria linear, teoria não linear e comparativo entre as duas teorias. Em cada grupo, de acordo com o método de cálculo escolhido pelo usuário, serão plotados os gráficos descritos a seguir, os quais serão apresentados no capítulo 4:

- Tensão vertical efetiva x relação da poropressão na base pela tensão vertical total;
- Tensão vertical efetiva x deformação vertical;
- Tensão vertical efetiva x índice de vazios;
- Tensão vertical efetiva x coeficiente de adensamento;
- Índice de vazios x condutividade hidráulica.

Além da geração dos gráficos, o programa gera um arquivo em forma de planilha do Microsoft Excel[®] com os resultados dos cálculos, já filtrados, para que o usuário possa consultá-los e utilizá-los como desejar.

3.2 VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para validar os algoritmos implementados na ferramenta computacional AnáliseCRS foram utilizados dados publicados na literatura e realizados ensaios de laboratório, conforme descrito a seguir.

Com relação aos dados publicados, foram escolhidos dois trabalhos nos quais haviam sido realizados ensaios CRS e que os dados obtidos durante a realização dos mesmos estivessem disponíveis. Assim, foram utilizados os dados de Vitor (2012) e de Ferraz (2006) para a validação do programa, sendo que os dados do primeiro autor se encontravam no corpo do trabalho e os do segundo foram fornecidos pelo mesmo.

As comparações entre os resultados publicados pelos autores e os obtidos com o emprego do programa AnáliseCRS estão apresentados no Capítulo 4.

3.3 O SOLO UTILIZADO

Para a realização dos ensaios de adensamento com os objetivos de validar o programa desenvolvido nessa dissertação e proceder a um comparativo entre resultados dos ensaios incremental e CRS, foi utilizada uma amostra de solo proveniente de um dique de contenção de sedimentos de uma mina de extração de ferro-níquel, a qual foi denominada de Amostra 01. Os corpos de prova foram utilizados na condição compactada.

3.4 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Os ensaios para a caracterização do solo utilizado foram realizados com base nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Estes ensaios consistiram nos seguintes: análise granulométrica (ABNT, 2016a); peso específico dos sólidos (ABNT, 1984a); limite de plasticidade (ABNT, 1984b) e limite de liquidez (ABNT, 1984c).

A seguir, foi realizado o ensaio de compactação, na energia do proctor normal, para determinar os valores do teor de umidade ótimo (w_{ot}) e do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$), conforme método descrito na norma ABNT NBR 7182 (ABNT, 2016b).

3.5 ENSAIOS DE ADENSAMENTO

Visando proceder à validação do programa desenvolvido e fazer comparativos entre resultados de ensaios de adensamento com carregamento incremental e ensaios CRS, foi realizado um ensaio de adensamento incremental, na situação inundada, e dois ensaios CRS, conforme descrito nas próximas seções.

3.5.1 Ensaio Edométrico Incremental

O ensaio edométrico incremental foi realizado tomando como referência a norma ABNT NBR 12007 (ABNT, 1990) adotando-se os seguintes estágios de carregamento do corpo de prova: 6,25 kPa; 12,5 kPa; 25 kPa; 50 kPa; 100 kPa; 200 kPa; 400 kPa; 800 kPa; 1600 kPa e 3200 kPa. Para o descarregamento foi adotada a seguinte sequência: 3200 kPa; 400 kPa; 100 kPa e 6,25 kPa. Cada estágio do carregamento teve duração aproximada de 24 horas, sendo que no descarregamento aguardou-se o tempo necessário para estabilizar a expansão

do corpo de prova, devido a cada descarregamento. O ensaio teve duração total de 12 dias.

O corpo de prova para o ensaio foi obtido por meio de compressão estática de uma porção do solo preparada com uma quantidade de água correspondente ao teor de umidade ótimo. A compressão foi realizada até obter um peso específico correspondente ao obtido no ponto de ótimo do ensaio de compactação.

Para a realização do ensaio, após a montagem do corpo de prova na célula e feitos os ajustes iniciais, procedeu-se à inundação do mesmo desde o primeiro estágio de carregamento.

3.5.2 Ensaio CRS

Como não existe norma brasileira para o ensaio CRS, o procedimento de ensaio foi baseado naquele descrito em Head (1986).

A obtenção dos corpos de prova para este ensaio também foi realizada por compressão estática, de forma semelhante ao do corpo de prova do ensaio incremental. Para isso, foi utilizado um molde confeccionado especialmente para fazer a compressão do solo dentro do anel de adensamento utilizado no ensaio CRS. Este molde é ilustrado na Figura 14, onde pode-se observar o local de encaixe do anel de adensamento metálico, o qual possui 63 mm de diâmetro e 25,5 mm de altura.

Assim, após o umedecimento do solo com o teor de umidade desejado, coloca-se dentro do molde uma quantidade de massa úmida que, após compactada, atinja o peso específico estipulado para o ensaio. A compressão do solo é realizada por um pistão acoplado a uma prensa manual, conforme ilustrado na Figura 15, que comprime a parte central do molde até a posição desejada. Na Figura 16 é apresentado um detalhe do anel após a compactação de um corpo de prova dentro do mesmo.

Figura 14: Desenho esquemático do molde para compactação de corpos de prova

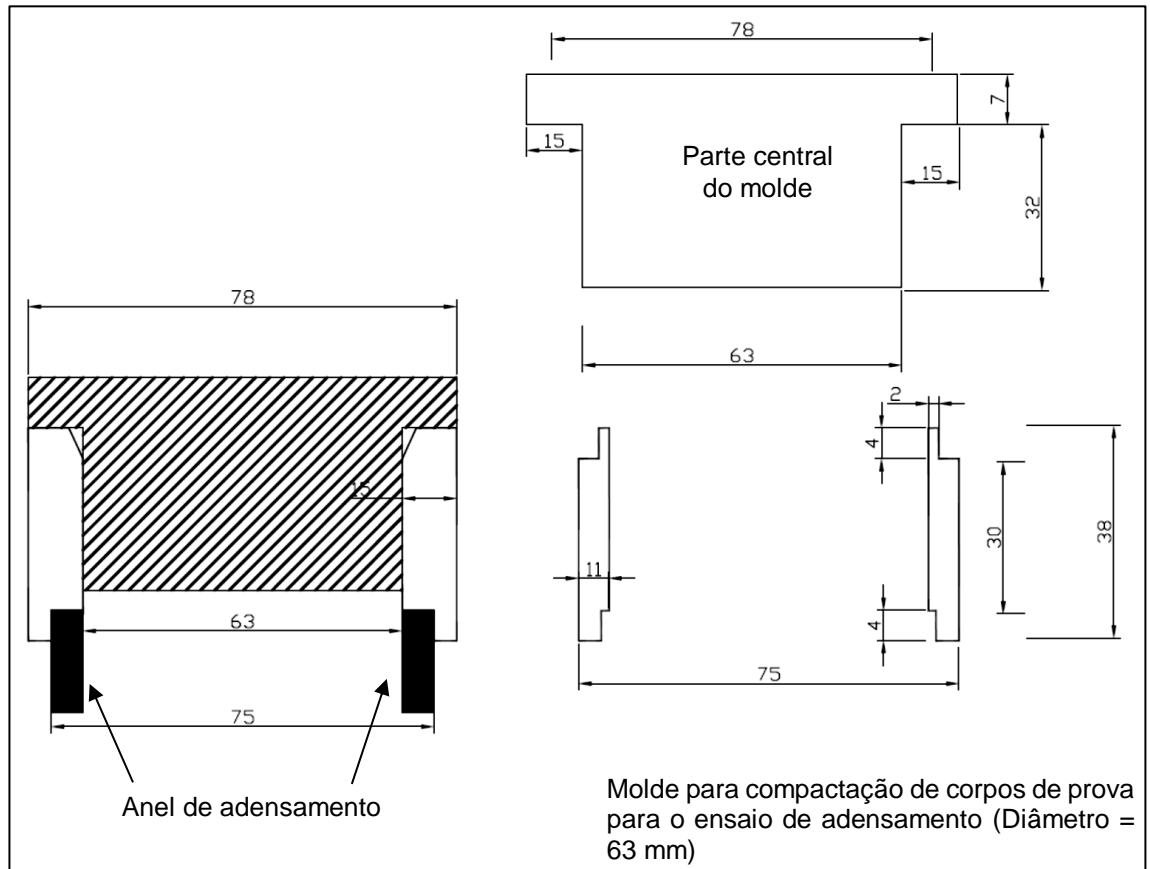


Figura 15: Solo sendo compactado dentro no anel metálico

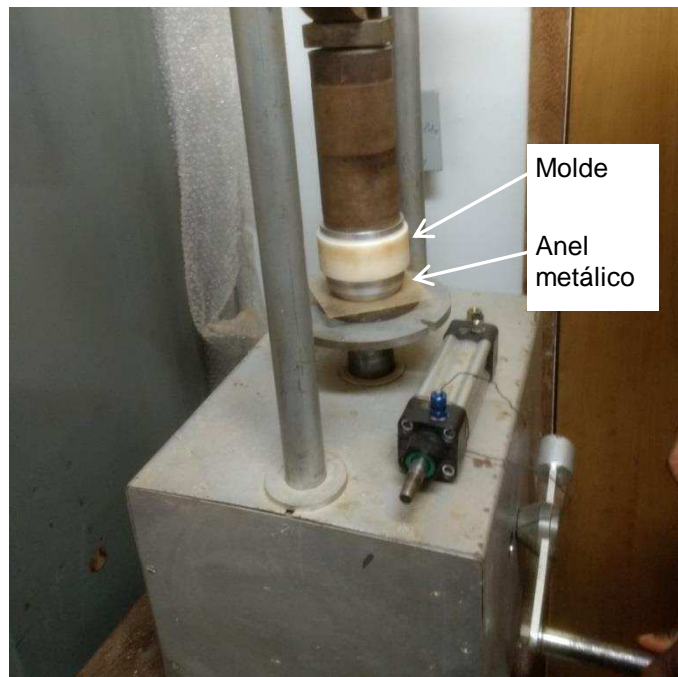


Figura 16: Solo compactado dentro do anel metálico



Como após a compressão do solo pela parte central do molde haverá uma folga entre a mesma e o topo do anel (Figura 14), deve-se rasar o topo do corpo de prova para conformá-lo ao volume interno do anel. Essa operação é executada assim que o anel metálico é retirado de dentro do molde, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17: Superfície de solo excedente do anel sendo rasada



Após a realização das operações anteriores, procede-se à colocação do anel metálico com o corpo de prova dentro da célula do ensaio CRS, na qual haverá uma pedra porosa na base e outra no topo do mesmo. A pedra porosa da base será conectada ao sistema de medição das poropressões geradas durante o ensaio e a pedra porosa do topo permitirá a drenagem do corpo de prova. A seguir, posiciona-se o cabeçote de carregamento no topo do corpo de prova, o qual será o responsável por receber e aplicar as tensões verticais ao longo do ensaio (Figura 18).

Figura 18: Corpo de prova dentro da célula CRS



Para finalizar a montagem, fecha-se a célula e procede-se ao enchimento da mesma com água e à inundação do corpo de prova. A Figura 19 mostra a célula CRS preparada para iniciar o ensaio.

Figura 19: Célula CRS pronta para ser ensaiada



Para saturar o corpo de prova, inicialmente procede-se à percolação de água através do mesmo, sob uma pressão de 1,0 mca durante 24 horas, para remover as bolhas de ar presentes nos vazios comunicantes. A seguir, aplicam-se estágios de contrapressão até atingir a saturação.

Após atingida a saturação, a célula do ensaio CRS é colocada na prensa (também utilizada para o ensaio triaxial) para fazer os ajustes necessários e a conexão da mesma ao sistema responsável pela aquisição de dados durante o ensaio. Após esta preparação, ajusta-se a velocidade de deslocamento do prato de acordo com a velocidade escolhida para o ensaio. No caso dos ensaios realizados nesse trabalho, foi adotada uma velocidade igual a 0,05 mm/min.

As leituras a serem realizadas se referem à da força vertical aplicada ao corpo de prova, do deslocamento vertical de seu topo, da poropressão gerada na base e do tempo transcorrido desde o início do ensaio. A Figura 20 mostra um ensaio sendo executado.

Figura 20: Execução do ensaio CRS com o uso de uma prensa do ensaio triaxial



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados com relação à ferramenta computacional desenvolvida para a interpretação de ensaios CRS, bem como o processo de sua validação com base em dados da literatura e dos ensaios de laboratório executados para essa finalidade.

4.1 PROGRAMA AnáliseCRS

Ao ser executado, o programa apresenta a tela mostrada na Figura 21, a partir da qual o usuário deve informar alguns dados iniciais, proceder à escolha do(s) método(s) de análise e fazer a leitura do arquivo com os dados gerados durante a execução do ensaio.

Figura 21: Tela inicial do programa AnáliseCRS



Conforme proposta inicial, buscou-se criar uma interface simples, amigável e com os recursos para a entrada e a leitura dos dados do ensaio. Como o principal objetivo é a disponibilização dessa ferramenta para o público em geral, descreve-se a seguir os procedimentos básicos para a sua utilização.

Inicialmente o usuário deverá inserir os dados de entrada do ensaio que consistem: no valor da altura inicial do corpo de prova (H_0) em milímetros; no valor da contrapressão utilizada (C_p), em quilopascal, e no valor do índice de vazios inicial (e_0) do corpo de prova.

A seguir, o usuário deve selecionar a metodologia de cálculo desejada, sendo que o programa permite fazer isso de três formas diferentes: pode ser marcada apenas a opção referente ao método linear, que é baseado na teoria de Smith e Wahls (1969); pode ser marcada apenas a caixa referente à teoria não linear de Wissa *et al.* (1971) ou, então, podem ser marcadas as caixas correspondentes aos dois métodos de análise. No caso dessa última opção, como resultado serão apresentados os gráficos referentes a cada método e um comparativo entre os dois.

Caso seja necessário algum tipo de ajuda durante a utilização do programa, na barra de menus do mesmo existe um item denominado “Sobre”. Ao clicar sobre este menu, será exibido para o usuário um arquivo com uma explicação resumida sobre os métodos de cálculo, apresentando inclusive as principais equações utilizadas.

Após fornecidos os dados de entrada, o usuário deve clicar no botão “Ler Arquivo de Dados” para que o programa carregue os dados que foram obtidos durante a realização do ensaio CRS. Assim, ao clicar no botão citado, será aberta uma janela para a seleção do arquivo com os dados de interesse.

Visando tornar o programa de uso mais geral, que possa ser utilizado com qualquer conjunto de leituras, criou-se um modelo de arquivo de dados, com extensão “.xls” (formato do Microsoft Excel®), no qual o usuário deve dispor seus dados. Este modelo está disponível no menu “Dados de Entrada” e possui a apresentação mostrada na Figura 22. Na preparação do arquivo de dados, o

usuário deve obedecer, rigorosamente, as posições (linha e coluna) indicadas no modelo, bem como as unidades pré-definidas.

Figura 22: Exemplo da configuração do arquivo com os dados de entrada

	A	B	C	D	E	F
1	PARÂMETROS DE ENTRADA					
2	TEMPO	DESLOCAMENTO	TENSÃO	POROPRESSÃO		
3	(s)	(mm)	(kgf/cm ²)	(kPa)		
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19	* Os campos amarelos devem ser preenchidos com os dados nas unidades indicadas.					
20	** As posições iniciais de cada parâmetro devem ser respeitadas, linha e coluna.					

Após o processamento dos cálculos, os resultados serão apresentados na forma de gráficos e também serão automaticamente salvos em um arquivo no formato “.xls”. Isso visa proporcionar ao usuário a possibilidade de verificar os valores obtidos e/ou fazer uma outra forma de apresentação dos seus resultados. Os tipos de gráficos gerados pelo programa serão ilustrados na próxima seção.

4.2 VALIDAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA

A primeira etapa de validação do programa AnáliseCRS consistiu comparar os resultados do programa com outros disponíveis na literatura, cujos autores utilizaram metodologias de cálculo semelhantes.

Conforme já descrito, foram utilizados os dados de Vitor (2012) e de Ferraz (2006) que são apresentados e comparados nas próximas seções.

4.2.1 Validação com os dados de Vitor (2012)

Para proceder à verificação do desempenho do ensaio de adensamento CRS comparado com o ensaio de adensamento incremental (SIC), Vitor (2012) realizou ensaios CRS e utilizou as teorias linear e não linear, descritas anteriormente, para fazer o cálculo de seus ensaios. Para isso, a autora utilizou uma planilha eletrônica para obter os diversos parâmetros do ensaio, conforme apresentado na Tabela 8, a qual foi utilizada como referência para proceder à validação proposta neste trabalho.

O processo de validação consistiu inicialmente em montar um arquivo com os dados de Vitor (2012), utilizando o modelo de arquivo descrito na seção 4.1, e em seguida utilizar o programa AnáliseCRS para processar o arquivo e obter os parâmetros de interesse.

Como resultado, o programa gerou os gráficos descritos na seção 3.1.3, sendo que para efeitos comparativos são apresentados a seguir somente aqueles referentes aos mesmos cálculos feitos por Vitor (2012). Assim, na Figura 23 é apresentado o gráfico da tensão vertical efetiva x deformação vertical, no qual tem-se a comparação dos resultados para a teoria linear. Já, na Figura 24, tem-se os mesmos tipos de gráficos, porém para a teoria não linear.

Observando os gráficos verifica-se que existe um pequeno deslocamento entre os resultados comparados. Esse deslocamento pode ser atribuído às diferentes formas de proceder aos cálculos referentes às teorias linear e não linear, de Smith e Wahls (1969) e de Wissa *et al.* (1971), respectivamente.

Assim, Vitor (2012) fez o cálculo das tensões verticais efetivas, com base nos valores instantâneos da tensão vertical total e da poropressão em um tempo t_1 . Por outro, no AnáliseCRS esse cálculo é feito com base nos valores médios observados entre os tempos t_1 e t_2 , conforme procedimento descrito na norma D 4186 (ASTM, 1999) e em Bardet (1997). Porém, ambos os gráficos se desenvolvem de forma muito semelhante, o que permite concluir que o algoritmo implementado no programa parece estar funcionando corretamente.

Tabela 8: Tabela com os resultados do ensaio CRS (Vitor, 2012)

Time	Force Reading	Pore Reading	Frame Pulses	Total Vertical Stress	Pore Pressure	Displacement	Vertical Strain	Effective Vertical Stress NÃO-LINEAR	Effective Vertical Stress NÃO-LINEAR	Effective Vertical Stress LINEAR	Effective Vertical Stress LINEAR	Deformation Rate	Coefficient of Volume Change LINEAR	Coefficient of Volume Change NÃO-LINEAR	Avg. Specimen Height	Avg. Pore Pressure CORRIGIDA	Avg. Total Vertical Stress CORRIGIDA	Consolidation Coefficient NÃO-LINEAR	Consolidation Coefficient LINEAR	Hydraulic Conductivity NÃO-LINEAR	Hydraulic Conductivity LINEAR	Excess Pore Pressure Ratio	Excess Pore Pressure Ratio
sec	volts	volts	#	kPa	kPa	cm	%	kPa	kPa	kPa	kPa	cm/sec	1/kPa	1/kPa	cm	kPa	kPa	cm ² /sec	cm ² /sec	cm/sec	cm/sec		
60	-0.0043	0.007	977	2.5	1.2	0.005169	0.1988077	0.19880	1.6	1.3	1.7												??
120	-0.0041	0.065	1961	2.9	0.9	0.010380	0.3992308	0.39900	2.2	2.0	2.3	8.68E-05	3.66E-03	7.71E-03	2.6	1.1	2.7	1.49E-02	2.17E-02	1.15E-05	1.19E-05	0.3230	0.450
180	-0.0038	0.066	2941	3.4	1.0	0.015560	0.5984615	0.59850	2.7	2.4	2.8	8.64E-05	3.93E-03	4.67E-03	2.6	1.0	3.2	2.64E-02	3.06E-02	1.23E-05	1.12E-05	0.2880	0.370
240	-0.0033	0.062	3925	4.4	0.8	0.020770	0.7988462	0.79870	3.8	3.6	3.8	8.68E-05	1.90E-03	2.61E-03	2.6	0.9	3.9	5.06E-02	6.52E-02	1.32E-05	1.44E-05	0.1770	0.209
300	-0.0025	0.061	4909	5.8	0.7	0.025970	0.9988462	0.99890	5.3	5.1	5.3	8.68E-05	1.35E-03	1.52E-03	2.6	0.7	5.1	1.00E-01	1.12E-01	1.53E-05	1.54E-05	0.1240	0.132
360	-0.0017	0.059	5890	7.3	0.6	0.031160	1.1984615	1.19900	6.8	6.7	6.9	8.65E-05	1.31E-03	1.47E-03	2.6	0.7	6.5	1.15E-01	1.32E-01	1.70E-05	1.82E-05	0.0840	0.088
420	-0.0005	0.006	6874	9.4	0.7	0.036370	1.3988462	1.39900	9.0	8.7	9.0	8.68E-05	9.36E-04	9.63E-04	2.6	0.6	8.3	1.82E-01	1.80E-01	1.75E-05	1.66E-05	0.0700	0.078
480	0.0008	0.065	7858	11.8	0.9	0.041580	1.5992308	1.59900	11.2	10.9	11.2	8.68E-05	9.22E-04	8.90E-04	2.6	0.8	10.6	1.56E-01	1.37E-01	1.38E-05	1.17E-05	0.0800	0.081
540	0.0021	0.069	8842	14.1	1.2	0.046780	1.7992308	1.79900	13.4	12.9	13.4	8.68E-05	9.06E-04	8.95E-04	2.6	1.0	13.0	1.18E-01	1.11E-01	1.05E-05	9.40E-06	0.0820	0.090
600	0.0031	0.068	9822	16.0	1.1	0.051970	1.9988462	1.99900	15.2	14.9	15.2	8.64E-05	1.08E-03	1.16E-03	2.6	1.1	15.0	8.37E-02	8.91E-02	9.71E-06	9.83E-06	0.0690	0.072
660	0.0045	0.073	10806	18.5	1.4	0.057170	2.1988462	2.19900	17.6	17.1	17.6	8.68E-05	8.51E-04	8.26E-04	2.5	1.2	17.2	1.07E-01	9.94E-02	8.81E-06	7.83E-06	0.0750	0.080
780	0.0062	0.071	12774	21.6	1.3	0.067580	2.5992308	2.59900	20.7	20.3	20.7	8.68E-05	1.27E-03	1.36E-03	2.5	1.3	20.0	6.05E-02	6.52E-02	8.20E-06	8.46E-06	0.0590	0.063
840	0.0075	0.072	13754	23.9	1.3	0.072770	2.7988462	2.79900	23.0	22.6	23.1	8.64E-05	8.60E-04	8.81E-04	2.5	1.3	22.8	9.43E-02	9.50E-02	8.31E-06	8.06E-06	0.0550	0.056
900	0.0083	0.078	14738	25.4	1.7	0.077980	2.9992308	2.99900	24.3	23.7	24.3	8.68E-05	1.63E-03	1.44E-03	2.5	1.5	24.7	5.02E-02	4.66E-02	7.20E-06	6.42E-06	0.0650	0.070
960	0.0095	0.083	15722	27.6	1.9	0.083180	3.1992308	3.19900	26.3	25.7	26.3	8.68E-05	1.01E-03	9.62E-04	2.5	1.8	26.5	6.20E-02	5.96E-02	5.97E-06	5.48E-06	0.0700	0.072
1,020	0.0001	0.079	16703	28.5	1.7	0.088370	3.3988462	3.39900	27.3	26.8	27.3	8.65E-05	1.90E-03	2.31E-03	2.5	1.8	28.0	2.54E-02	2.79E-02	5.85E-06	6.16E-06	0.0600	0.062
1,080	0.0112	0.077	17687	30.6	1.6	0.093580	3.5992308	3.59900	29.6	29.0	29.6	8.68E-05	8.90E-04	9.54E-04	2.5	1.7	29.5	6.71E-02	7.13E-02	6.40E-06	6.56E-06	0.0520	0.054
1,140	0.0117	0.079	18670	31.5	1.7	0.098780	3.7992308	3.79900	30.4	29.8	30.4	8.67E-05	2.40E-03	2.29E-03	2.5	1.7	31.1	2.79E-02	2.77E-02	6.37E-06	6.11E-06	0.0540	0.056
1,200	0.0126	0.079	19654	33.2	1.7	0.104000	4.0000000	3.99900	32.0	31.5	32.0	8.68E-05	1.23E-03	1.27E-03	2.5	1.7	32.4	4.83E-02	4.96E-02	6.14E-06	6.09E-06	0.0520	0.053
1,260	0.0135	0.081	20635	34.8	1.8	0.109200	4.2000000	4.19900	33.6	33.0	33.6	8.65E-05	1.28E-03	1.27E-03	2.5	1.8	34.0	4.66E-02	4.64E-02	5.92E-06	5.69E-06	0.0520	0.054
1,320	0.0148	0.082	21619	37.2	1.9	0.114400	4.4000000	4.39900	35.9	35.3	35.9	8.68E-05	8.63E-04	8.78E-04	2.5	1.8	36.0	6.41E-02	6.48E-02	5.63E-06	5.50E-06	0.0500	0.053
1,380	0.0154	0.083	22603	38.3	1.9	0.119600	4.6000000	4.60000	37.0	36.4	37.0	8.68E-05	1.91E-03	1.90E-03	2.5	1.9	37.7	2.86E-02	2.90E-02	5.44E-06	5.32E-06	0.0500	0.051
1,440	0.0164	0.081	23587	40.1	1.8	0.124800	4.8000000	4.80000	38.8	38.3	38.9	8.68E-05	1.06E-03	1.14E-03	2.5	1.9	39.2	4.83E-02	5.10E-02	5.50E-06	5.62E-06	0.0450	0.046

Figura 23: Gráficos de tensão vertical efetiva x deformação vertical - Teoria linear

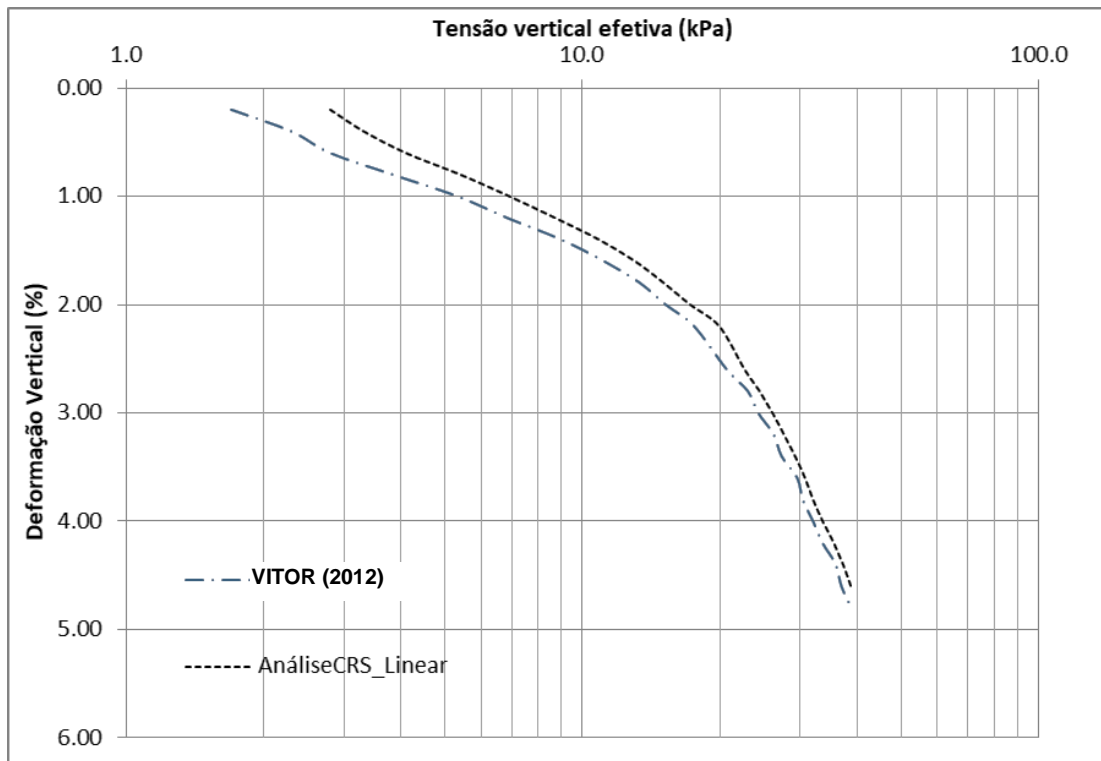
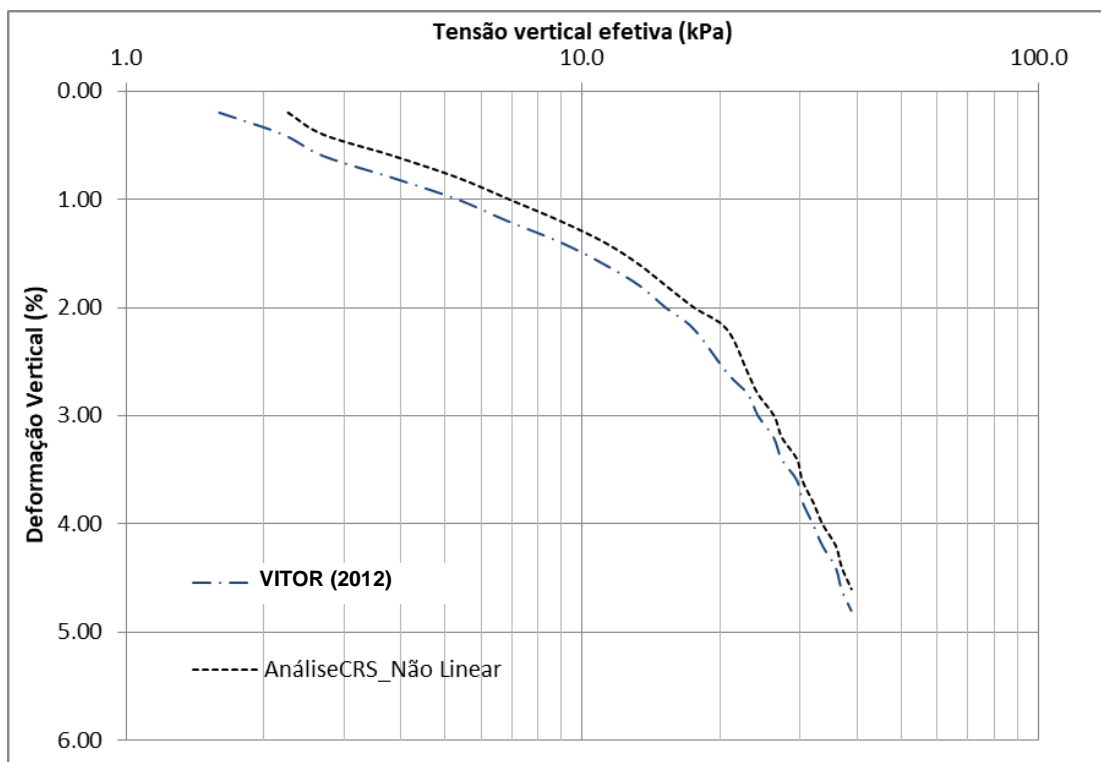


Figura 24: Gráficos de tensão vertical efetiva x deformação vertical - Teoria não linear



Na Figura 25 são apresentados os gráficos da tensão vertical efetiva *versus* o valor do coeficiente de adensamento, calculados conforme Vitor (2012) e pelo programa AnáliseCRS. Comparando os dois gráficos, verifica-se que a coincidência entre eles é muito boa, sendo as ligeiras diferenças observadas também se devem às formas como os dados foram utilizados no processamento dos cálculos, descrita anteriormente.

Os gráficos comparativos do índice de vazios *versus* a condutividade hidráulica são apresentados na Figura 26 onde podem ser observadas as mesmas diferenças relatadas nos gráficos anteriores.

Figura 25: Comparativo do gráfico da tensão vertical efetiva x coeficiente de adensamento

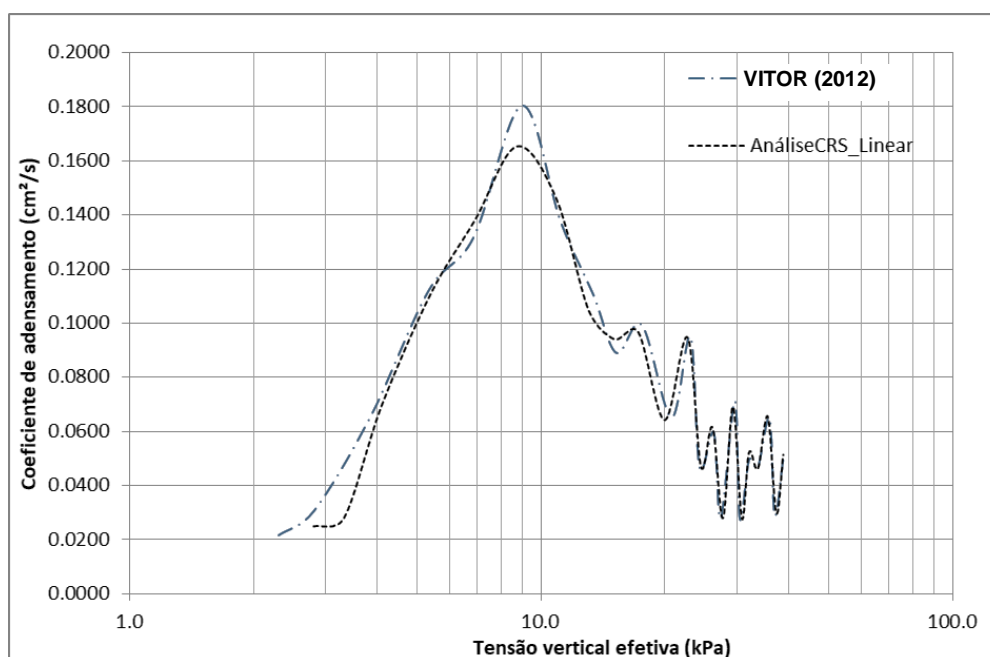
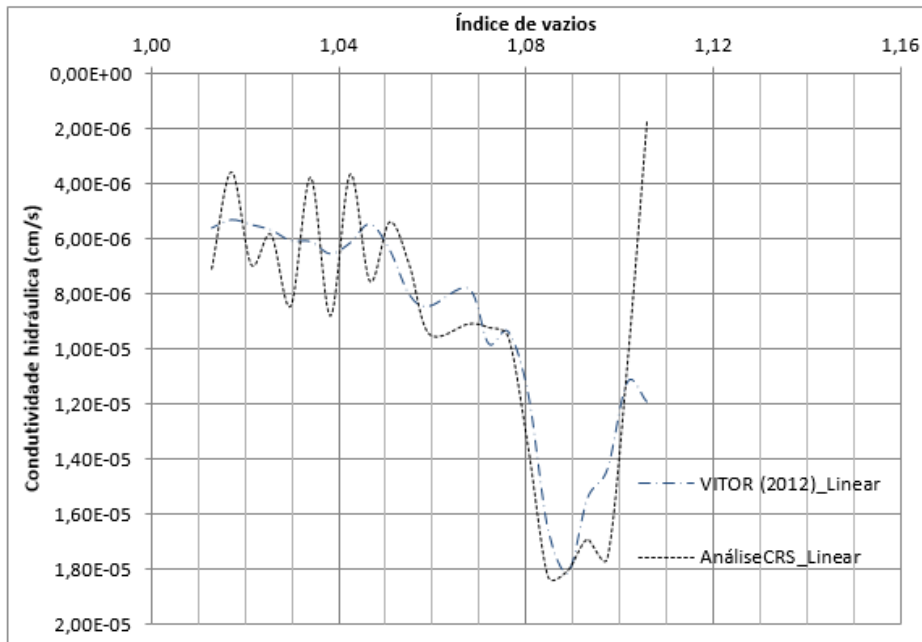


Figura 26: Comparativo do gráfico do índice de vazios x condutividade hidráulica



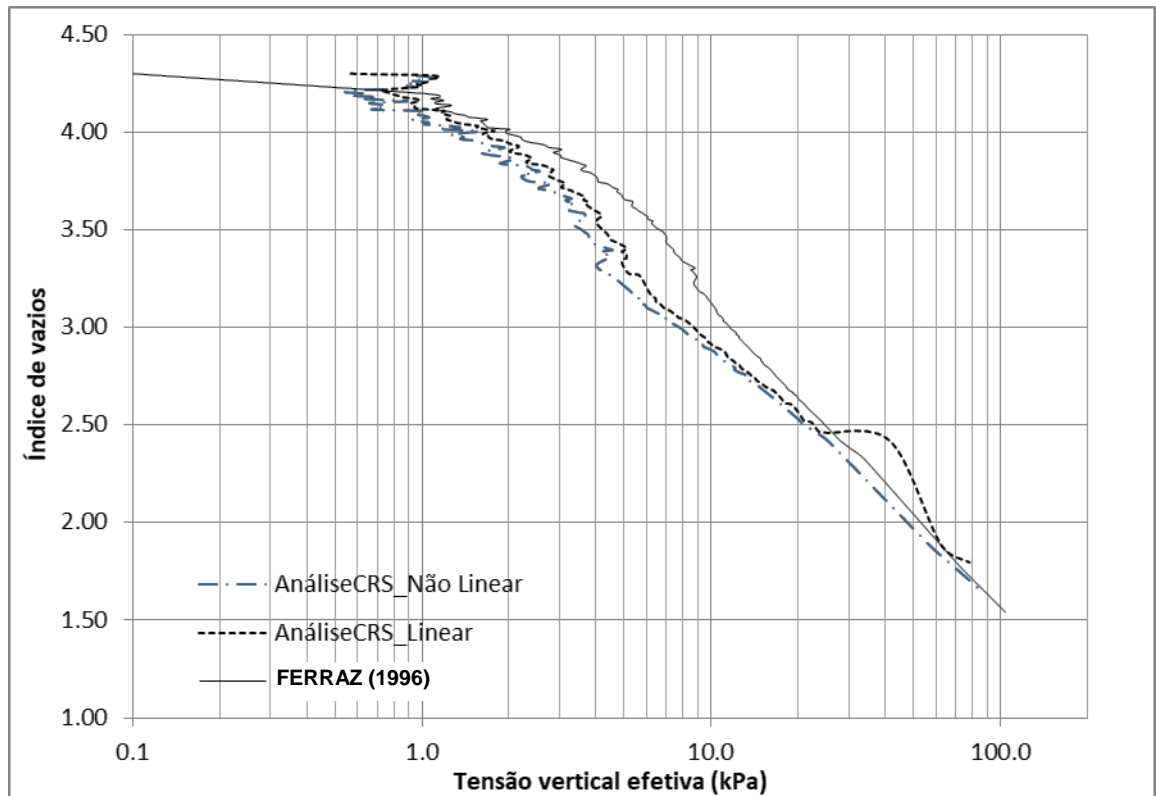
4.2.2 Validação com os dados de Ferraz (1996)

Ferraz (1996) utilizou ensaios de adensamento incremental e CRS visando obter as relações $e \times \sigma'_v$ e $k \times e$ e para fazer a modelagem do adensamento com deformações finitas utilizando a teoria de Gibson et al. (1967).

Na Figura 27 são apresentados os gráficos da tensão vertical efetiva versus o índice de vazios, oriundos dos resultados de Ferraz (1996), que utilizou a teoria linear de Smith e Wahls (1969), e do programa AnáliseCRS, utilizando as teorias linear e não linear.

Tal como observado em relação aos resultados de Vitor (2012), nota-se um pequeno desvio entre os resultados apresentados na Figura 27, que nesse caso se deve também ao fato de Ferraz (2006) não ter considerado valores médios em cada intervalo de tempo utilizado nos cálculos. Porém, verifica-se que o comportamento das curvas é bem similar, mostrando que o programa AnáliseCRS está fazendo o processamento corretamente.

Figura 27: Gráfico comparativo da tensão vertical efetiva x índice de vazios



4.3 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

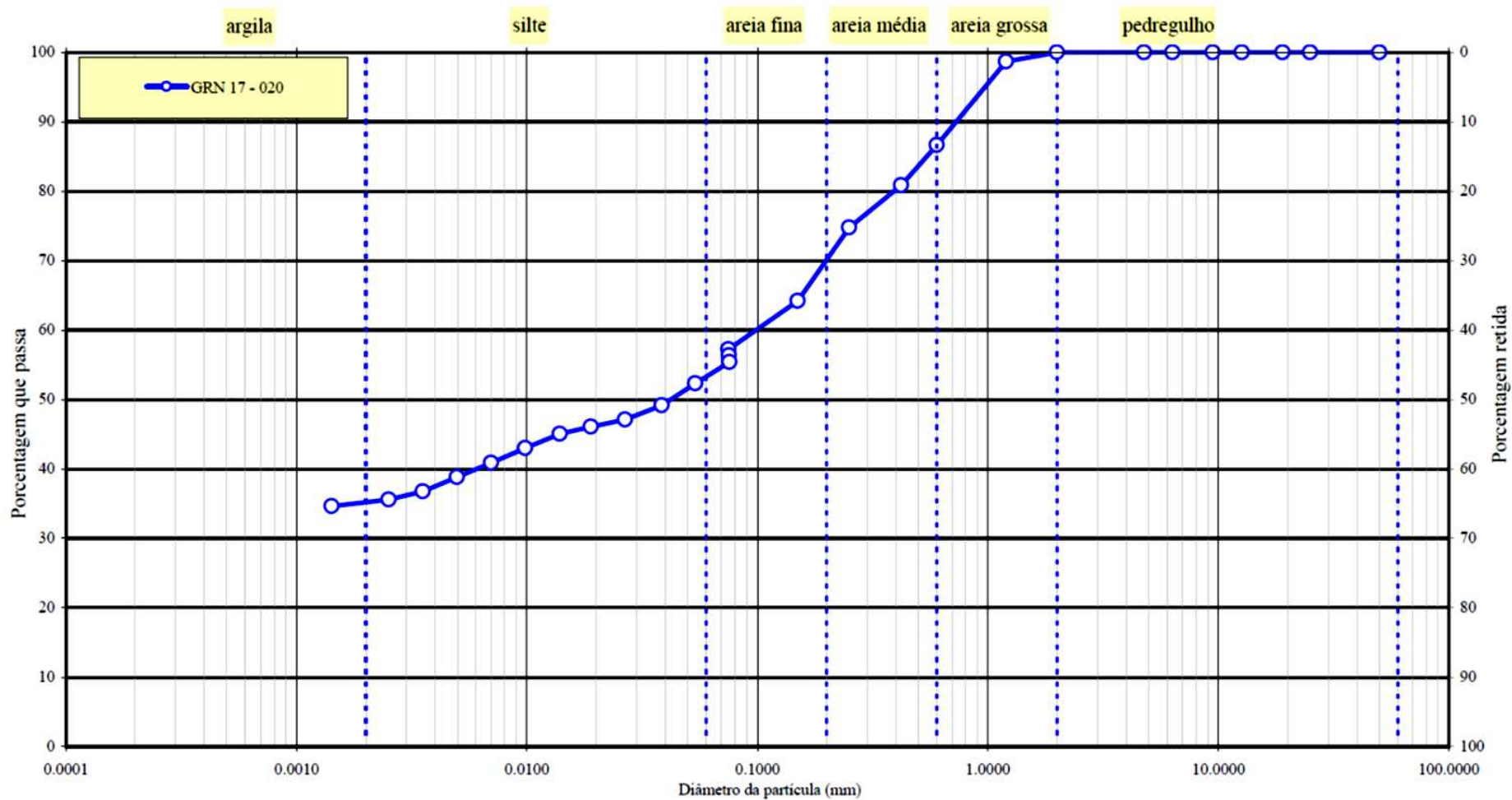
Na Figura 28 é apresentada a curva granulométrica e, na Tabela 9 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, os resultados dos ensaios de caracterização e de compactação do solo utilizado nos ensaios de adensamento incremental e de CRS.

Com base na curva granulométrica e nos valores do LL e LP, o solo pode ser classificado como um silte (ML) segundo o método de classificação unificado.

Tabela 9: Resultados dos ensaios de caracterização e de compactação

Ensaio	γ_s (kN/m ³)	LL (%)	LP (%)	W _{ot} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)
AMOSTRA 01	27,85	39	26	20,61	17,08

Figura 28: Curva granulométrica da Amostra 01



4.4 ENSAIO DE ADENSAMENTO INCREMENTAL

Para o ensaio de adensamento incremental foi moldado um corpo prova compactado, cujas características antes do ensaio são apresentadas na Tabela 10. Vale ressaltar que este ensaio foi realizado na condição inundada visando obter uma condição de umidade próxima daquela utilizada no ensaio CRS.

Tabela 10: Características do corpo de prova no ensaio de adensamento incremental

		Antes do ensaio
Diâmetro	cm	5.104
Altura	cm	2.226
Tara do Anel	g	13.07
Massa Bruta Úmida	g	106.80
Teor de Umidade Ótimo	%	20.61
Peso Específico Seco Max	kN/m ³	17.08
Massa Bruta Seca	g	89.54
Faces Drenantes		2
Área	cm ²	20.46
Volume	cm ³	45.56
Teor de Umidade *	%	21.33
Peso Específico Natural	kN/m ³	20.18
Peso Específico Seco	kN/m ³	16.46
Peso Específico dos Sólidos	kN/m ³	27.85
Grau de Compactação	%	96.35
Índice de Vazios		0.692
Grau de Saturação	%	87.54

Na Tabela 11 são apresentados os dados referentes aos estágios de carregamento utilizados no ensaio, bem como os cálculos referentes a cada um deles, feitos com o uso de uma planilha eletrônica. Os valores do coeficiente de adensamento apresentados foram obtidos pelo processo de Taylor, que não exige a ocorrência de adensamento secundário para o seu cálculo, condição essa mais próxima da que ocorre no ensaio CRS.

Tabela 11: Leituras do ensaio de adensamento convencional referentes às fases de carregamento e descarregamento do corpo de prova

Tensão kPa	Li mm	Lf mm	ΔH mm	H mm	Hv mm	ϵ %	e	Δe	a_v 10^{-3} kPa^{-1}	m_v 10^{-3} kPa^{-1}
0.00				22.26	9.10	0.00	0.692			
6.25	23.000	22.988	0.012	22.25	9.09	0.05	0.691	0.001	0.146	0.086
12.50	22.988	22.968	0.020	22.23	9.07	0.14	0.690	0.002	0.243	0.144
25.00	22.968	22.943	0.025	22.21	9.05	0.26	0.688	0.002	0.152	0.090
50.00	22.943	22.907	0.036	22.17	9.01	0.42	0.685	0.003	0.109	0.065
100.00	22.907	22.835	0.072	22.10	8.94	0.74	0.679	0.005	0.109	0.065
200.00	22.835	22.716	0.119	21.98	8.82	1.28	0.670	0.009	0.090	0.054
400.00	22.716	22.502	0.214	21.76	8.61	2.24	0.654	0.016	0.081	0.049
800.00	22.502	22.147	0.355	21.41	8.25	3.83	0.627	0.027	0.067	0.041
1600.00	22.147	21.438	0.709	20.70	7.54	7.02	0.573	0.054	0.067	0.043
3200.00	21.438	20.723	0.715	19.99	6.83	10.23	0.519	0.054	0.034	0.022
3200.00	0.000	0.000	0.000	19.99	6.83	10.23	0.519			
400.00	20.723	20.924	-0.20	20.19	7.03	9.33	0.534			
100.00	20.924	21.095	-0.171	20.36	7.20	8.56	0.547			
6.25	21.095	21.245	-0.150	20.51	7.35	7.88	0.559			
6.25	21.245	21.245	0.000	20.51	7.35	7.88	0.559			
6.25	21.245	21.245	0.000	20.51	7.35	7.88	0.559			
6.25	21.245	21.245	0.000	20.51	7.35	7.88	0.559			
6.25	21.245	21.245	0.000	20.51	7.35	7.88	0.559			
6.25	21.245	21.245	0.000	20.51	7.35	7.88	0.559			
6.25	21.245	21.245	0.000	20.51	7.35	7.88	0.559			

Na Figura 29 apresenta-se o gráfico da tensão de adensamento *versus* o índice de vazios do corpo de prova, na qual figura constam também os procedimentos gráficos para a determinação da tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) pelos processos de Casagrande e de Pacheco Silva. Assim, segundo estes métodos o valor de σ'_{vm} será igual a 459 kPa e 474 kPa, respectivamente.

Na Figura 30 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta-se o gráfico da tensão de adensamento x deformação vertical.

Figura 29: Gráfico da tensão de adensamento x índice de vazios do corpo de prova

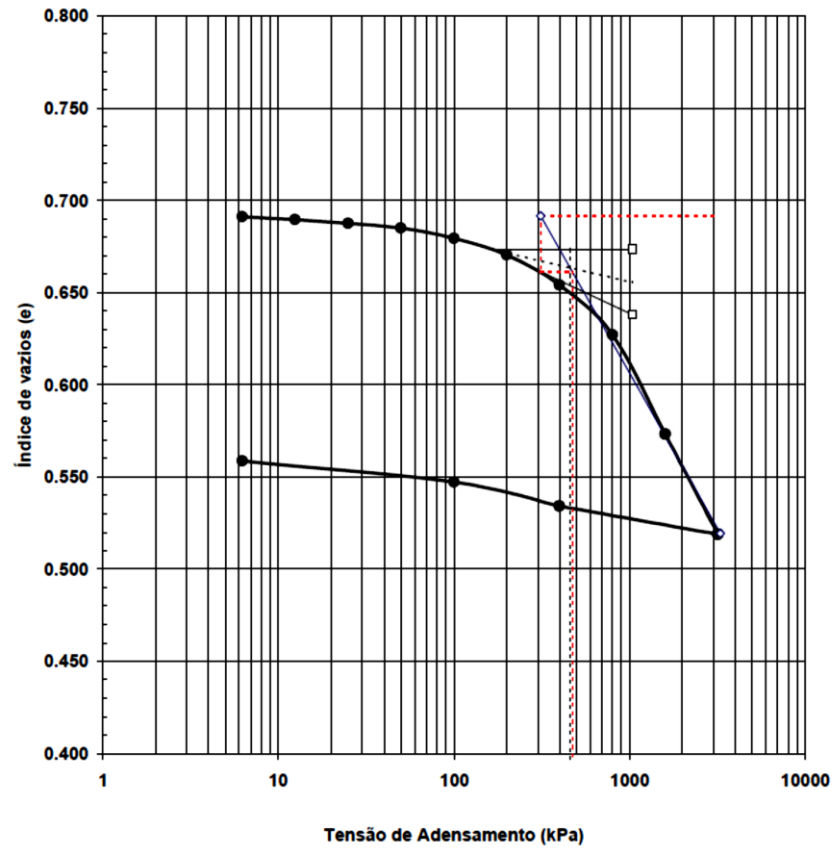
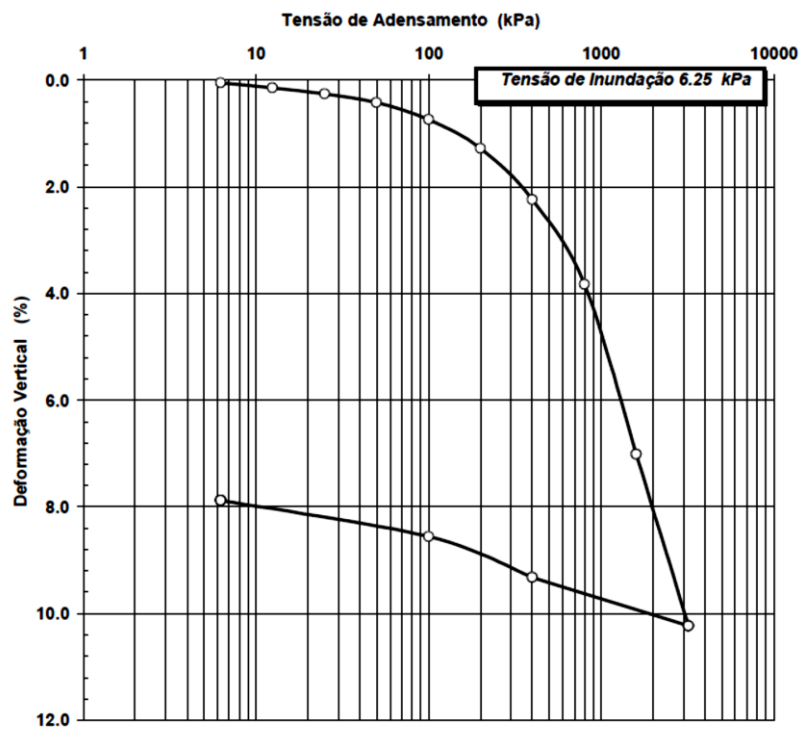


Figura 30: Gráfico da tensão de adensamento x deformação vertical do corpo de prova



4.5 ENSAIO CRS

Nas Tabelas 12 e 13 são apresentadas as características iniciais dos dois corpos de prova utilizados para a realização dos ensaios CRS desse trabalho. Como pode ser observado nas tabelas, o processo de moldagem utilizado permitiu a obtenção de corpos de prova com valores dos índices físicos iniciais muito próximos.

Na Figura 31 e na Figura 32 são apresentados os gráficos gerados pelo programa AnáliseCRS para o corpo de prova 1, referentes à variação do índice de vazios e da deformação vertical com a tensão vertical efetiva. Como pode ser observado nestas figuras, apesar da presença de “ruídos” nas leituras iniciais, o emprego da teoria não linear permitiu a obtenção de uma curva contínua ao longo de todo o intervalo de tensões. Porém, com o emprego da teoria linear, só foi possível obter boas curvas a partir de tensões verticais com valores mais elevados.

Tabela 12: Características gerais do corpo de prova 1 para o ensaio CRS

		Antes do ensaio
Diâmetro	cm	6.33
Altura	cm	2.55
Tara do Anel	g	75.50
Massa Bruta Úmida	g	236.50
Teor de Umidade Ótimo	%	20.61
Peso Específico Seco Max	kN/m ³	17.09
Massa Bruta Seca	g	208.88
Faces Drenantes		2
Área	cm ²	31.47
Volume	cm ³	80.25
Teor de Umidade *	%	20.58
Peso Específico Natural	kN/m ³	19.68
Peso Específico Seco	kN/m ³	16.31
Peso Específico dos Sólidos	kN/m ³	27.85
Grau de Compactação	%	0,707
Índice de Vazios		0.71
Grau de Saturação	%	82.52

Tabela 13: Características gerais do corpo de prova 2 para o ensaio CRS

		Antes do ensaio
Diâmetro	cm	6.33
Altura	cm	2.55
Tara do Anel	g	75.50
Massa Bruta Úmida	g	235.95
Teor de Umidade Ótimo	%	20.61
Peso Específico Seco Max	kN/m ³	17.09
Massa Bruta Seca	g	208.37
Faces Drenantes		2
Área	cm ²	31.47
Volume	cm ³	80.25
Teor de Umidade *	%	20.58
Peso Específico Natural	kN/m ³	19.61
Peso Específico Seco	kN/m ³	16.24
Peso Específico dos Sólidos	kN/m ³	27.85
Grau de Compactação	%	0,715
Índice de Vazios		0.71
Grau de Saturação	%	81.76

Figura 31: Gráfico e x log σ'_v do corpo de prova 1 gerado pelo programa AnáliseCRS

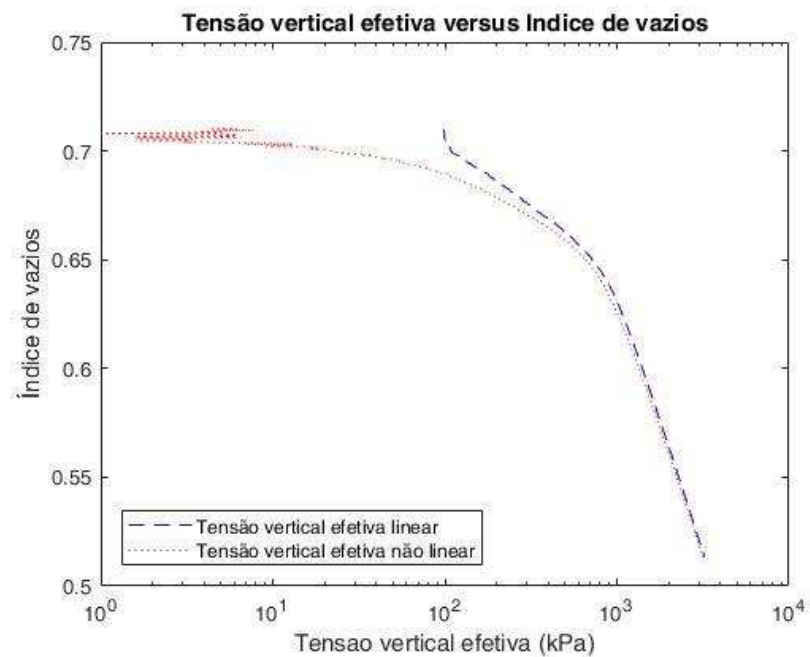
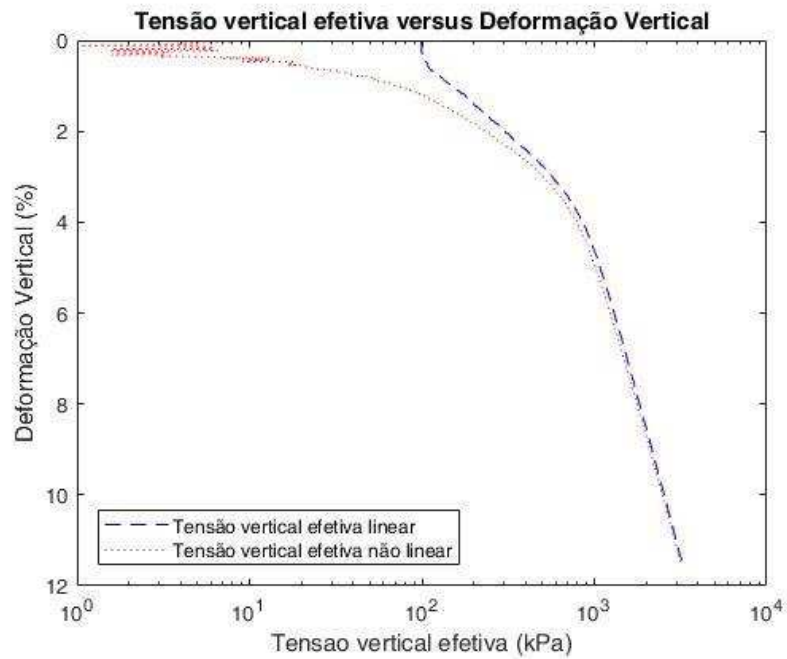


Figura 32: Gráfico $\varepsilon_v \times \log \sigma'_v$ do corpo de prova 1 gerado pelo programa AnáliseCRS



Na Figura 33 e na Figura 34 são apresentados os gráficos gerados pelo programa AnáliseCRS para o corpo de prova 2, nos quais verifica-se também um melhor comportamento da teoria não linear, quando ocorre a presença de “ruídos” nas leituras iniciais.

Figura 33: Gráfico e x $\log \sigma'_v$ do corpo de prova 2 gerado pelo programa AnáliseCRS

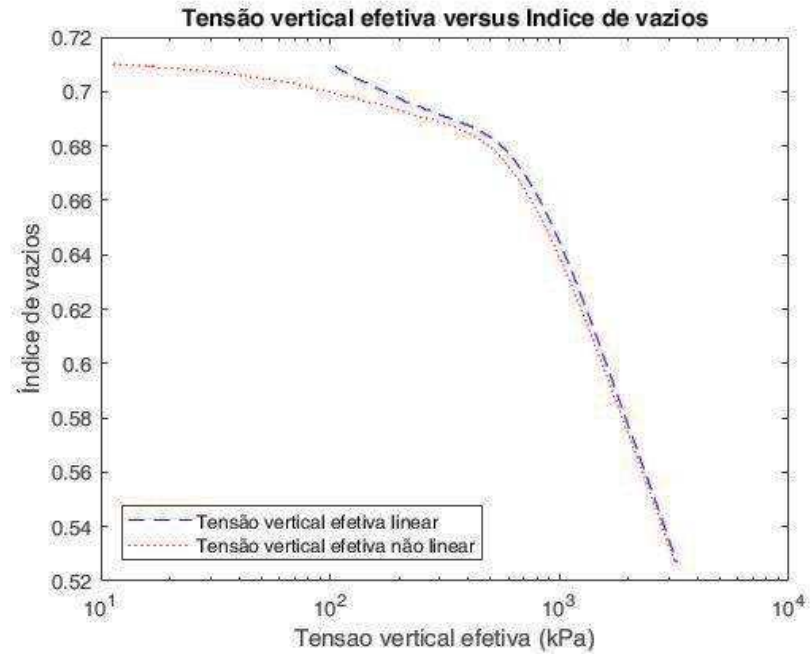
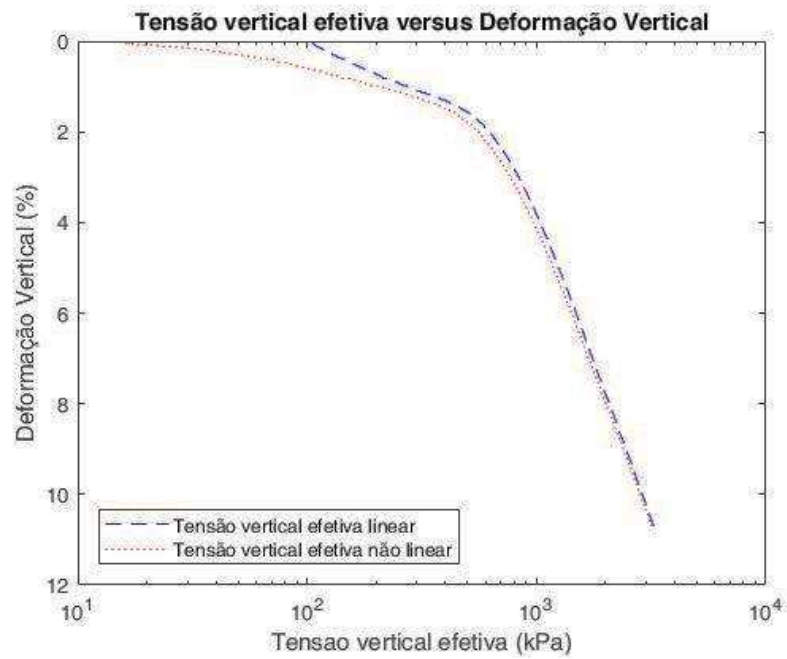


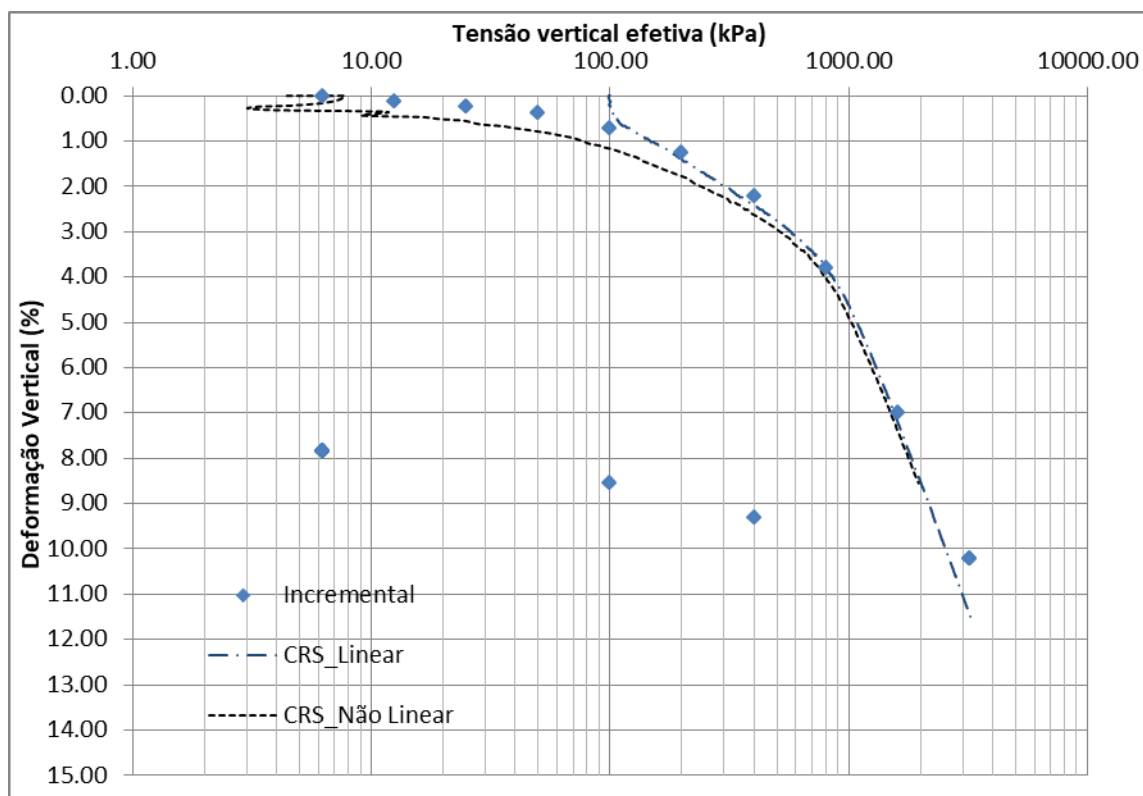
Figura 34: Gráfico ϵ_v x $\log \sigma'_v$ do corpo de prova 2 gerado pelo programa AnáliseCRS



4.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS INCREMENTAL E CRS

Na Figura 35 é apresentado o gráfico da tensão vertical efetiva *versus* a deformação vertical, no qual estão plotados os resultados do ensaio de adensamento incremental e do ensaio CRS realizado com o corpo de prova 1. Como pode ser observado nesta figura, a concordância entre os resultados dos ensaios foi muito boa, principalmente quando no caso do ensaio CRS foi utilizada a teoria não linear para o processamento dos dados. Porém, nos trechos do ensaio em que não houveram “ruídos”, o emprego da teoria linear resultou em uma curva que reproduziu muito bem os resultados do ensaio incremental.

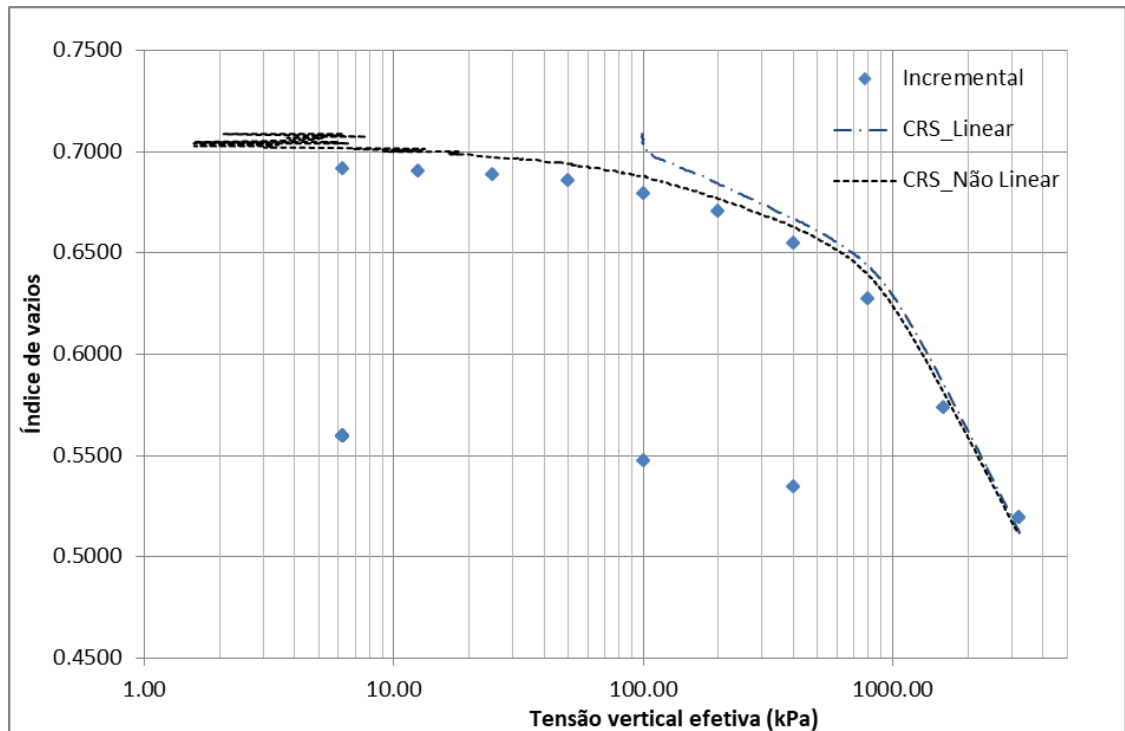
Figura 35: Tensão vertical efetiva x deformação vertical - Ensaio de adensamento incremental e ensaio CRS com o corpo de prova 1



Na Figura 36 é apresentado o gráfico da tensão vertical efetiva *versus* índice de vazios com os resultados do ensaio de adensamento incremental e do ensaio CRS realizado com o corpo de prova 1. Para este gráfico também se observa

uma concordância muito boa entre os resultados do ensaio de adensamento incremental e o ensaio CRS com o corpo de prova 1.

Figura 36: Tensão vertical efetiva x índice de vazios - Ensaio de adensamento incremental e ensaio CRS com o corpo de prova 1



Na Figura 37 é apresentado o gráfico da tensão vertical efetiva *versus* a deformação vertical com os resultados do ensaio de adensamento incremental e do ensaio CRS com o corpo de prova 2. Como pode ser observado na figura, a realização do ensaio CRS com o segundo corpo de prova também permitiu reproduzir muito bem os resultados do ensaio de adensamento incremental.

Na Figura 38 é apresentado o gráfico da tensão vertical efetiva *versus* índice de vazios para o corpo de prova 2. No caso desse gráfico, observa-se um maior deslocamento entre as curvas dos dois ensaios, o que se deve ao maior índice de vazios do corpo de prova 2 no início do ensaio. Porém, conforme mostrado na Figura 37, as deformações verticais entre os dois corpos de prova foram praticamente as mesmas, mostrando que o ensaio CRS pode substituir o ensaio de adensamento incremental com muitas vantagens, conforme descrito.

Figura 37: Tensão vertical efetiva x deformação vertical - Ensaio de adensamento incremental e ensaio CRS com o corpo de prova 2

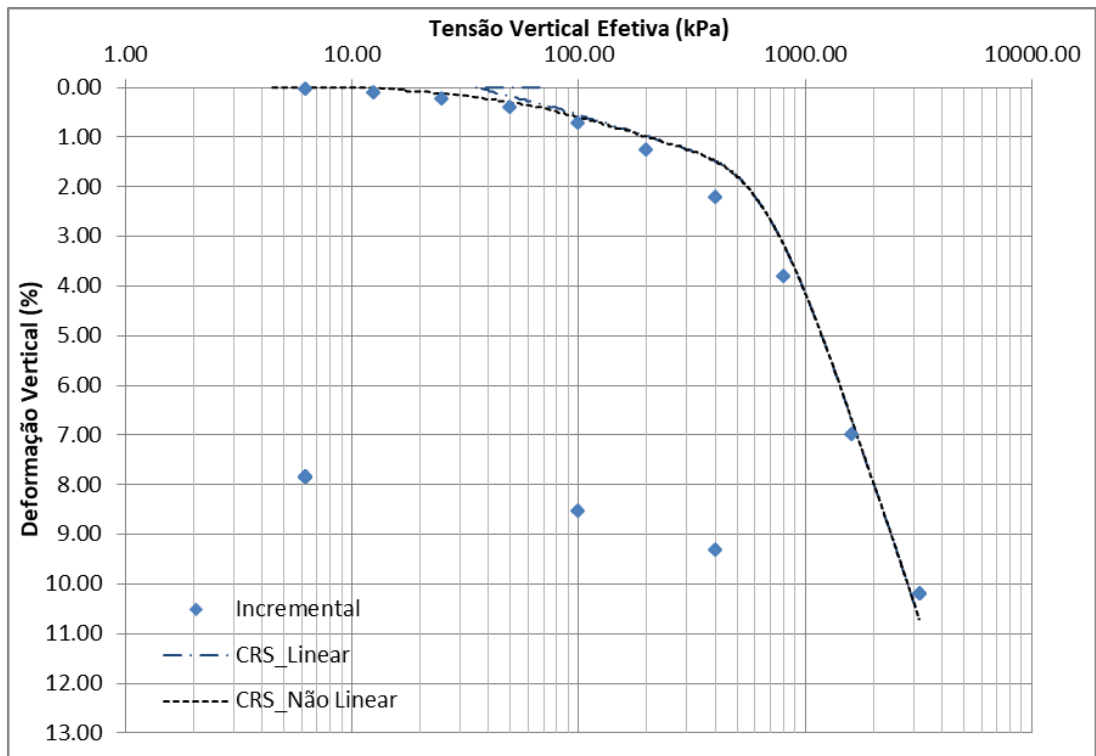
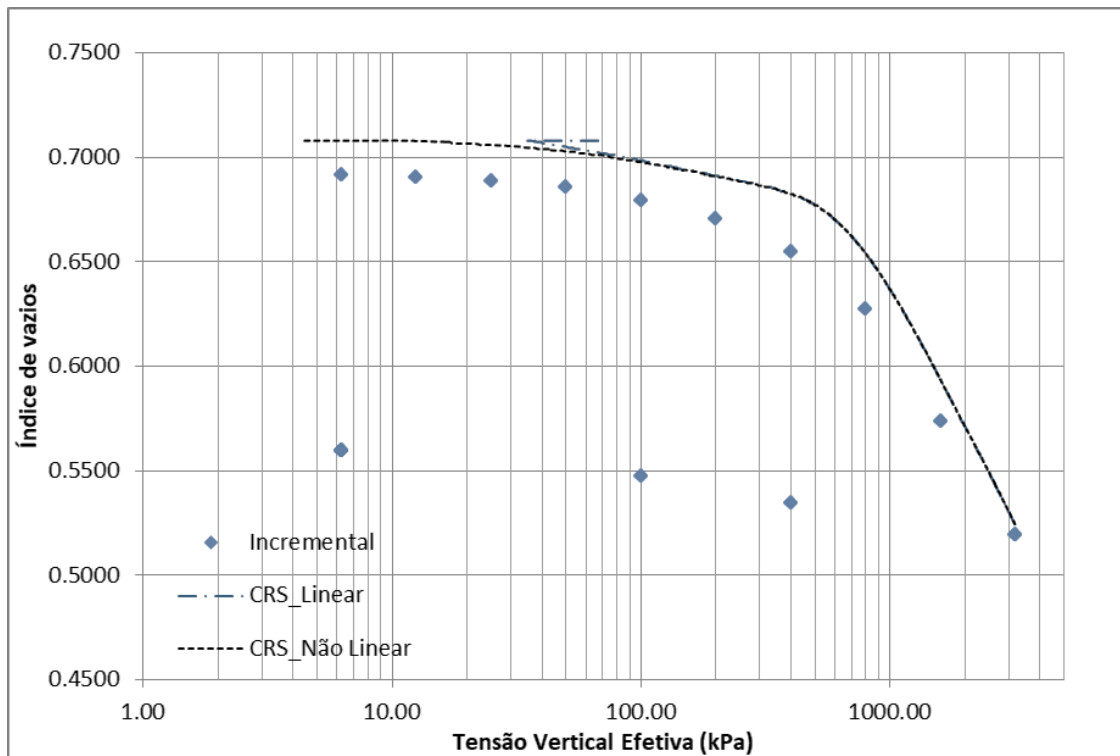


Figura 38: Tensão vertical efetiva x índice de vazios - Ensaio de adensamento incremental e ensaio CRS com o corpo de prova 2



Apesar de não ser o foco principal desse trabalho, a comparação entre os resultados do ensaio incremental e dos ensaios CRS permitiu verificar que em um período de tempo bem inferior ao do ensaio incremental, foi possível executar os ensaios CRS e obter as curvas do ensaio de adensamento.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base no trabalho desenvolvido nesta pesquisa, apresentam-se nas próximas seções as conclusões e as recomendações para futuros trabalhos.

5.1 CONCLUSÕES

A ferramenta computacional AnáliseCRS, desenvolvida para análise e interpretação de ensaios de adensamento com deformação controlada (CRS), com base na teoria linear de Smith e Wahls (1969) e na teoria não linear de Wissa *et al.* (1971), se mostrou adequada para esta finalidade. Como principais características da mesma citam-se a interface simples, amigável, com recursos para a entrada e a leitura dos dados dos ensaios, além de recursos para a visualização de gráficos e gravação dos resultados do processamento em arquivo.

O processo de validação dos algoritmos de cálculo referentes às teorias citadas, comparando os resultados do programa com outros publicados na literatura, mostrou que o programa desenvolvido está processando os cálculos de forma coerente com os trabalhos tomados como referência.

A ferramenta implementada no programa para filtrar e eliminar resultados inconsistentes, decorrentes da sensibilidade do sistema de aquisição de dados que pode captar bruscas oscilações nas leituras, parece estar funcionando corretamente uma vez que os gráficos gerados pelo programa não apresentaram pontos com valores inconsistentes.

A comparação dos resultados de ensaios de adensamento incremental e ensaios CRS, realizados em corpos de prova compactados, mostrou que as teorias implementadas no programa AnáliseCRS conseguiram reproduzir de forma bastante próxima os resultados do ensaio incremental.

Isso, vem a corroborar as afirmações da literatura sobre o ensaio CRS, de que o mesmo é uma excelente opção para substituir os ensaios de adensamento incremental, principalmente por necessitar de equipamentos relativamente simples e ser possível de executar em um período de tempo muito inferior.

Mesmo com as vantagens citadas, o ensaio CRS ainda é pouco executado nos laboratórios de mecânica dos solos, sendo que uma das dificuldades apresentadas pelo mesmo é com relação ao processo de interpretação. Essa etapa do ensaio é bem mais trabalhosa que a do ensaio incremental, uma vez que geralmente envolve um grande volume de dados e cálculos matemáticos. Por conta disso, o desenvolvimento e a disponibilização de uma ferramenta como a apresentada nessa dissertação pode auxiliar em muito na análise e interpretação do ensaio, além de estimular o uso do mesmo.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Com base nos estudos realizados, sugere-se:

- Implementar no software outras teorias para análise de ensaios CRS, principalmente aquelas que consideram deformações finitas.
- Realizar estudos com diferentes tipos de solos (de baixa e alta compressibilidade) e amostras (compactadas e indeformadas) para avaliar a aplicabilidade das teorias implementadas a cada uma dessas situações.
- Proceder a estudos mais detalhados para avaliar a influência da velocidade nos resultados, quando comparados aos do ensaio incremental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOSHI, H.; YOSHIKUMI, H.; MARUYAMA, S. **Constant loading rate testing. Soils and Foundations**, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. X, n.1, p. 43-56, 1970.

ADAMS, A. L. **Laboratory evaluation of the constant rate of strain and constant head techniques for measurement of the hydraulic conductivity of fine grained soils**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Massachusetts Institute of Technology. Cambridge. 2011.

ALBORTA, F. L. **Constant Rate of Strain Tests on Reconstituted Clay: a Parametric Study**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Ghent University. Belgium, 1997.

ANDRADE, M. E. S. **Contribuição ao estudo das argilas moles da cidade de Santos**. Dissertação (Mestre em Engenharia) COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D-4186: Standard Test Method for One-dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled Strain Loading. Philadelphia, Estados Unidos. 1999.

ASAOKA, A. **Observational procedure of settlement prediction**. Soil and foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, v.18, n.4, p.87-101, dezembro 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12007: ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016a. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016b. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984c. 8 p.

BARDET, J.P. **Experimental Soil Mechanics**. Prentice Hall, 1997.

BAPTISTA, H. M. **Ensaio de Campo e Laboratório na Argila Mole da Enseada do Cabrito, Salvador, Bahia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/ RJ, Rio de Janeiro, 1998.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. I, 1988.

CARVALHO, S. R. L. **Ensaio de adensamento edométrico com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo na argila do Sarapuí**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 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, out. 1993.

CRAWFORD, C. B. **Interpretation of the Consolidation Test**. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. ASGE, vol.90, p.93-108, 1964.

CRAWFORD, C. B. **Resistance of Soil Structure to Consolidation**. Canadian Geotechnical Journal. Vol.2, p.90-115, 1965

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução de EZ2 Translate. 7ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DAVIS, E. H. e RAYMOND, G. P. **A Non Linear Theory of Consolidation, Geotechnique** vol. 15, nº2, pp. 161-173, 1965.

FERRAZ, R. L. **Acoplamento dos processos do adensamento e do transporte de contaminantes em solos compressíveis**. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

GARCIA, S. G. F. **Relação entre o adensamento secundário e a relaxação de tensões de uma argila mole submetida à compressão edométrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1996.

GIBSON, R. E., ENGLAND, G. L. E HUSSEY, M. J. L. The theory of onedimensional consolidation of saturated clays, Géotechnique, v. 17, n. 3, pp. 261-273, 1967.

GONZALEZ, J. H. **Experimental and theoretical investigation of constant rate of strain consolidation.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) Massachusetts Institute of Technology. Cambridge. 2000.

GORMAN, C. T., HOPKINS, T. C., DRNEVICH, V. P. **Constant Rate of Strain and Controlled Gradient Testing.** Geotechnical Testing Journal, ASTM. Vol.1, n.1,p3-15, 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.

HAMILTON, J. J., CRAWFORD, C. B. **Improved Determination of Preconsolidation pressure of a Sensitive Clay. Symposium on Time Rates of Loading in Soil Testing.** America Society for Testing and Materials, p.254-271, 1959

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing.** v.3, London: Pentech Press, 1986.

IMAI, G. – **Development of a new consolidation test procedure.** Soils Found., 19 (3), pp. 45 – 60, 1979.

JANBU, N.; TOKHEIM, O.; SENNESET, K. Consolidation tests with continuous loading. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10th, 1981, Stockholm, vol. 1, p. 645-654.

KASSIN, A. K.; CLARKE, B. G. **Constant Rate of Strain Consolidation Equipment and Procedure for Stabilized Soils.** Geotechnical Testing Journal, v. 22, p. 13-21, 1999.

KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. **Craig Mecânica dos Solos.** Tradução de A. E. A. KURBAN. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

LEE, K. **Consolidation with Constant Rate of Deformation.** Géotechnique, London, v. 31, n. 2, p. 215-229, 1981.

LEROUEIL, S., SAMSOM, L., BOZOZUK, M. **Laboratory and Field Determination of Preconsolidation Pressures at Gloucester.** Canadian Geotechnical Journal. Vol.20, n.3. p. 477-490, 1983.

LEROUEIL, S., KABBAJ, M., TAVENAS, F. **Study of the Validity of a σ'_v - ϵ_v - $\dot{\epsilon}_v$ Model in situ Conditions.** Soils and Foundations. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.28, p.13-25, 1985.

LEROUEIL, S.; HIGHT, D. W. **State of the Art: Behaviour and Properties of Natural Soils and Soft Rocks.** Characterization and Engineering Properties of Natural Soils. 2002.

LIMA, P. P. **Ensaio oedométrico com taxa de deslocamento constante em solos muito moles.** Dissertação (Mestre em Engenharia) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 1996.

LOWE, J. III et al. **Controlled Gradient Consolidation Test**. Journal of the soil mechanics and foundations division - American Society of Civil Engineers (ASCE), 1969. Sm 1. p 77- 97.

MASSAD, F. **Mecânica dos Solos Experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MONTEMEZZO, R. F. **Estudo comparativo de ensaios de compressão confinada em argilas e areias saturadas utilizando o ensaio CRS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005.

MOURA, A. P. **Adensamento com velocidade controlada de deformação (crs): desenvolvimento do equipamento e realização de ensaios em solos moles do leste de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2004.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SÄLLFORS, G. **Preconsolidation Pressure of Soft High Plastic Clays**. Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology. Suécia, 1975.

SHEAHAN, T. C., WATTERS, P. J. **Experimental Verification of CRS Consolidation Theory**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., v. 123, n. 5, p. 430-7, 1997.

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.

SOARES, J. M. D. **Estudo do Comportamento Geotécnico do Depósito de Argila Mole da Grande Porto Alegre**. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1997.

SPANNENBERG, M. G. **Caracterização geotécnica de um depósito de argila mole da baixada fluminense**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2003.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of Soil Mechanics**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1948.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecânica dos solos na prática da engenharia**. Tradução de A. J. C. NUNES e M. L. C. CAMPELLO. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1948.

VIEIRA, G. S. **Desenvolvimento de equipamento para ensaios CRS com sucção controlada e ensaios em solos não saturados cimentados artificialmente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2006.

VITOR, K. A. **Verificação do desempenho do ensaio de adensamento CRS comparado ao SIC**. Dissertação (Mestre em Engenharia) Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.

TAYLOR, D. W. **Serial 82**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 1942.

WAHLS, H. E., DEGODOY, N. S. **Interpretation of Consolidation Test – Discussion**. Journal of Soils Mechanics and Foundation Division. ASCE. Vol.91, p.147-152, 1965.

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.