

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VINÍCIUS EDUARDO DONA

**RELAÇÃO ENTRE O ADENSAMENTO SECUNDÁRIO E A RAZÃO DE
SOBREADENSAMENTO EM UM SOLO TÍPICO DE TOLEDO - PR.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2018

VINÍCIUS EDUARDO DONA

**RELAÇÃO ENTRE O ADENSAMENTO SECUNDÁRIO E A RAZÃO DE
SOBREADENSAMENTO EM UM SOLO TÍPICO DE TOLEDO – PR.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel, do curso de Engenharia
Civil, da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Maurício do
Espírito Santo Andrade

TOLEDO
2018



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 145

RELAÇÃO ENTRE O ADENSAMENTO SECUNDÁRIO E A RAZÃO DE SOBREADENSAMENTO EM UM SOLO TÍPICO DE TOLEDO – PR.

por

Vinícius Eduardo Dona

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 14h40 do dia **11 de Junho de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof Dr. Elmagno Catarino Santos Silva
(UTFPR – TD)

Profª Ma. Renathielly Fernanda da Silva
(UTFPR – TD)

Prof Dr. Maurício do Espirito Santo Andrade
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr Fulvio Natercio Feiber
Coordenador da COECI

RESUMO

O adensamento secundário é o fenômeno pelo qual as deformações que ocorrem com o tempo, sob tensão efetiva vertical constante, são atribuídas a dissipação da água adsorvida. A compreensão e verificação de tal fenômeno é essencial para entender o comportamento do solo saturado, acrescenta-se a isso, que o adensamento secundário pode gerar deformações pós-construtivas significativas. Através deste trabalho, foi possível estabelecer uma relação entre compressão secundária, expansão secundária e OCR para a amostra de solo coletada, no campus UTFPR-TD, seguindo o mecanismo proposto pelo Grupo de Reologia da COPPE. Para estabelecer essa relação, primeiramente foram coletadas amostras deformada e indeformada e feito ensaios de caracterização. Após essa etapa, foram realizados ensaios de adensamento secundário, onde foram gerados três OCR's distintos (1,05; 1,2 e 7,5). A relação proposta foi estabelecida através da análise das curvas de adensamento e compressão. Desse modo foi possível estimar que a linha de fim do secundário se encontra próximo a um OCR de 1,2. Além disso, observou-se o efeito da temperatura no adensamento secundário. Dessa forma, foi constatado que quanto maior a temperatura maior a velocidade de deformação.

Palavras-chave: Compressão secundária. Expansão secundária. Efeito da temperatura.

ABSTRACT

Secondary consolidation is the phenomenon by which the deformations that occur over time, under constant vertical effective stress, are attributed to the dissipation of the adsorbed water. The understanding and verification of such phenomena is essential to understand the behavior of saturated soil, it is added to this, that secondary consolidation can generate significant post – constructive strains. Through this work, it was possible to establish a relationship between secondary consolidation, secondary expansion and OCR for the soil sample collected at the UTFPR –TD campus, following the mechanism proposed by the Rheology Group of COPPE. To establish this relationship, firstly were collected samples deformed and undisturbed and characterization tests were made. After this step, secondary consolidation tests were performed, where three different OCR's (1.05; 1.2 and 7.5) were generated. The proposed relationship was established through the analysis of the consolidation and compression curves. In this way, it was possible to estimate that the end of secondary consolidation line is close to an 1.2 OCR. In addition, the effect of temperature on secondary consolidation was observed. Thus, it was found that the higher the temperature, the higher the volumetric strain rate.

Keywords: Secondary consolidation. Secondary expansion. Effect of temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Analogia mecânica para o processo de adensamento.....	18
Figura 02 – Adensamento unidimensional.	19
Figura 03- Porcentagem média de adensamento pelo fator tempo.....	24
Figura 04 – Comparação entre curva experimental e teórica.....	25
Figura 05 – Caminho de tensões efetivas de uma amostra normalmente adensada em um ensaio edométrico.	27
Figura 06 – Relação entre e (ou ε_v) x σ'_v considerando a compressão e expansão secundárias.	28
Figura 07 – Influência do adensamento secundário na tensão de sobreadensamento.	30
Figura 08 – Efeito da temperatura sobre a velocidade do adensamento secundário.	31
Figura 09 – Emprego de pré – carregamento.....	33
Figura 10 – Desenvolvimento dos recalques na presença de uma sobrecarga.	34
Figura 11 – Fluxograma esquemático das etapas a serem seguidas no desenvolvimento do trabalho.....	35
Figura 12 – Local da retirada das amostras de solo.....	36
Figura 13 – (A) Anel centralizador e anel biselado. (B) Cravador.	37
Figura 14 – (A) Escavação até a cota 0,7 m. (B) Processo de retirada dos anéis, com o anel biselado preenchido de solo.	38
Figura 15 – Amostra de solo rasada do anel biselada	39
Figura 16 – (A) Amostra destorroadada. (B) Material para o ensaio de análise granulométrica. (C) Material para os ensaios de limite de liquidez e plasticidade. (D) Material para o ensaio de densidade real dos grãos.	40
Figura 17 – Conjunto de peneiras utilizadas para o peneiramento grosso.....	41
Figura 18 – Ensaio de sedimentação.	42
Figura 19 – Aparelhagem utilizada para o ensaio de limite de liquidez.....	43
Figura 20 – Materiais utilizados para o ensaio de limite de plasticidade.	44
Figura 21 – (A) Dispensor. (B) Bomba de aplicação de vácuo. (C) Balança e balão volumétrico. (D) Suporte e termômetro.	46
Figura 22 – (A) Célula de adensamento desmontada, (B) Prensa Bishop de braço 1:10.	47

Figura 23 – (A) Incrementos de água diário na célula de adensamento. (B) Pesos no pendural.	49
Figura 24 – Influência da temperatura no adensamento secundário.....	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Determinação do limite de liquidez.	51
Gráfico 02 – Curva granulométrica.....	52
Gráfico 03 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 1,05).	54
Gráfico 04 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 1,2).	54
Gráfico 05 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 7,5).	55
Gráfico 06 – Deformação específica vertical x tempo dos três OCR's.	56
Gráfico 07 – Caminho de tensões ao longo da curva de compressão; 7.A – Caminho de tensões para os OCR's 1,05 e 1,2; 7.B – Caminho de tensões para o OCR 7,5.	58
Gráfico 08 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 1,05; com todas as leituras).....	59
Gráfico 09 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 1,2; com todas as leituras).	60
Gráfico 10 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 7,5; com todas as leituras).	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Cronograma do ensaio de adensamento secundário.....	50
Tabela 02 – Densidade real dos grãos.....	52
Tabela 03 – Características iniciais da amostra.....	53
Tabela 04 – Velocidades de deformação no início e no fim do ensaio.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

a_v : Coeficiente de compressibilidade

C_c : Índice de compressão

C_r : Índice de recompressão

C_v : Coeficiente de adensamento

e : Índice de vazios

e_0 : Índice de vazios inicial

G : Peso específico real

H : Altura inicial do corpo de prova

H_d : Altura máxima de drenagem

K_0 : Coeficiente de empuxo no repouso

K_{on} : Coeficiente de empuxo no repouso no normalmente adensado

m_v : Módulo de compressibilidade volumétrica

OCR : Razão de sobreadensamento

S : Grau de saturação

t : Tempo

T_v : Fator tempo

u : Pressão neutra

U_z : Grau de adensamento

V_v : Volume de vazios

V_s : Volume de sólidos

W : Teor de umidade

Z : Variável espacial que indica a distância da fronteira drenante

γ : Peso específico

γ_d : Peso específico seco

γ_w : Peso específico da água

ε_v : Deformação específica vertical;

ε_f : Deformação específica vertical ao término de cada estágio de descarregamento;

ε_i : Deformação específica vertical ao fim da expansão primária;

Δe : Variação do índice de vazios

σ' : Tensão efetiva

σ'_{ho} : tensão efetiva horizontal

σ'_{v0} : tensão efetiva vertical

σ_{h0} : tensão horizontal inicial

σ_{v0} : tensão vertical inicial

σ_{Vm} : Tensão de sobreadensamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivo específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	TEORIA DO ADENSAMENTO DE TERZAGHI E FRÖLICH (1936).....	16
2.1.1	Princípio das tensões efetivas.....	16
2.1.1.1	Definição de tensões efetivas.....	16
2.1.1.2	Importância das tensões efetivas no comportamento mecânico dos solos. ...	17
2.1.2	Analogia mecânica para o processo de adensamento.....	17
2.1.3	Hipóteses da teoria do adensamento.....	19
2.1.4	Comparação entre as curvas teórica e experimental	24
2.2	ADENSAMENTO SECUNDÁRIO.....	25
2.2.1	Influência do adensamento secundário na tensão de sobreadensamento.....	29
2.2.2	Influência da temperatura no adensamento secundário.....	31
2.2.3	Emprego de pré – carregamento para reduzir recalques futuros	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1	LOCAL DE COLETA DA AMOSTRA DE SOLO.....	36
3.2	RETIRADA DA AMOSTRA.....	36
3.2.1	Amostra “indeformada”	37
3.2.2	Amostra deformada.....	39
3.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	40
3.3.1	Análise Granulométrica	41
3.3.2	Limite de Liquidez	42
3.3.3	Limite de Plasticidade.....	44
3.4	ENSAIO DE ADENSAMENTO SECUNDÁRIO.....	47
3.4.1	Moldagem do Corpo de Prova.....	47
3.4.2	Metodologia do ensaio	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	51
4.2	ENSAIO DE ADENSAMENTO SECUNDÁRIO.....	53

4.2.1 Efeito de Temperatura.....	59
5 CONCLUSÕES.....	63
5.1 ADENSAMENTO SECUNDÁRIO.....	63
5.2 EFEITO DA TEMPERATURA.....	63
5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

O adensamento secundário é um assunto que se faz presente desde o início da mecânica dos solos, cujo início, segundo Futai (2010), deu-se com a divulgação do princípio das tensões efetivas e a teoria de adensamento de Terzaghi e Frölich 1936.

Mesmo sabendo-se da existência do fenômeno de adensamento secundário desde os primórdios da mecânica dos solos, esse ainda é um dos assuntos pouco compreendidos dentro da mecânica dos solos. Andrade (2014) afirma que o adensamento secundário ainda não está fenomenologicamente compreendido, sendo que grande parte da explicação do seu fenômeno é meramente observacional, tendo muito ainda a ser descoberto.

No entanto, a falta de domínio sobre o seu fenômeno não condiz com a sua falta de importância no cenário. Entre outros assuntos abordados, em seu trabalho, Futai (2010) faz uma análise de recalques totais ao longo do tempo, considerando o adensamento secundário. O mesmo autor acaba afirmando em sua tese que algumas vezes o adensamento secundário pode ser tão ou mais importante do que o adensamento primário, no quesito recalque total de uma estrutura.

A cidade de Toledo, de acordo com os dados da Embrapa (2007), está localizada na região oeste do estado do Paraná, região essa que apresenta uma grande quantidade de latossolo vermelho distroferrico. Tal solo pode apresentar grandes quantidades de argila em sua composição, e de acordo com Pinto (2006), solos argilosos apresentam uma tendência de apresentar adensamento secundário. Portanto, é de se esperar que o solo de Toledo – PR, quando saturado, apresente também deformações consideráveis devido a esse fenômeno.

Futai (2010) afirma que um bom método para conhecer o comportamento de um determinado solo, é a realização de ensaio de adensamento ou de relaxação de tensão, pois esses ensaios conseguem verificar o fenômeno de adensamento secundário.

Feijó (1991) acrescenta que é bastante difícil desenvolver um modelo com o qual se obtenha uma relação tensão-deformação-tempo para o solo, pois esse, normalmente apresenta um meio heterogêneo não contínuo, anisotrópico e com três fases, a sólida, a líquida e a gasosa. No entanto com o passar do tempo, foram

surgindo algumas hipóteses simplificadoras que tornaram esse trabalho mais fácil, um exemplo disso é a própria Teoria do Adensamento Unidimensional de Terzaghi e Frölich.

Em vista disso, será realizado um ensaio de adensamento com o intuito de verificar o fenômeno de adensamento secundário por descarregamento. O ensaio consistirá em obter uma amostra “indeformada”, que será retirada no terreno da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A área da geotécnica perante ao adensamento secundário é uma área de muitas incertezas e que tem muito a ser explorado. A compreensão desse fenômeno é de grande importância para o entendimento por completo do comportamento do solo, sendo responsável por uma parcela considerável nos recalques totais de edificações e aterros.

O conhecimento prévio da existência de recalques secundários, permitirá o engenheiro responsável pela obra adotar técnicas construtivas de acordo com o comportamento do solo, levando em conta não somente o recalque gerado pelo adensamento primário, como de costume, mas também o recalque gerado pelo secundário.

Além disso, o trabalho em questão tem como intuito o incentivo a mais pesquisas na área da mecânica dos solos saturado, sendo essa uma ciência nova que tem muito a ser descoberto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Verificar, a partir de um ensaio de adensamento secundário, realizada em uma amostra de solo coletada na região oeste da cidade de Toledo – PR, o mecanismo proposto pelo o Grupo de Reologia da COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia), para o fenômeno de compressão e expansão secundária.

1.2.2 Objetivo específicos

- Caracterizar a amostra de solo coletado na região oeste do município de Toledo – PR, especificamente dentro da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo.
- Estabelecer uma relação entre a compressão secundária, a expansão secundária e a razão de sobreadensamento (OCR);
- Contribuir com os estudos de adensamento secundário em solos saturados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de mais nada, é necessário um embasamento teórico de alguns tópicos para o entendimento teórico e práticos do ensaio que será realizado. Os tópicos que serão abordados nessa revisão bibliográfica são “Teoria do adensamento de Terzaghi e Frölich (1936)” e “Adensamento secundário”.

2.1 TEORIA DO ADENSAMENTO DE TERZAGHI E FRÖLICH (1936)

2.1.1 Princípio das tensões efetivas

Para Martins (1992), toda a estrutura teórica da Mecânica dos Solos Saturados está apoiada sobre o princípio das tensões efetivas proposta por Terzaghi. O mesmo autor ressalta que Terzaghi anunciou o seu princípio dividindo-o em duas partes. A primeira parte engloba a definição da tensão efetiva, já a segunda parte explica a importância da tensão efetiva.

2.1.1.1 Definição de tensões efetivas

Em qualquer ponto da massa do solo, esta está sujeita a uma tensão principal total (σ), que é a soma de duas parcelas de naturezas diferentes, as quais foram denominadas por Terzaghi como tensão efetiva e poropressão (AGUIAR, 2008).

Tensão efetiva (σ') é a tensão transmitida pelo contato entre as partículas do solo, já a pressão neutra (u) também denominada poropressão é a pressão que a água exerce entre os vazios do solo (PINTO, 2006).

Terzaghi definiu a equação da tensão efetiva a partir da diferença entre as tensões principais totais e a poropressão, como representado na equação 2.1 (MOTA, 1996).

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.1)$$

2.1.1.2 Importância das tensões efetivas no comportamento mecânico dos solos.

Segundo Terzaghi e Frölich (1936 apud FEIJÓ, 1991, p.06), “todos os efeitos mensuráveis resultantes de variações de tensões nos solos, como compressão, distorção e resistência ao cisalhamento, são devidos a variações de tensões efetivas”.

Ou seja, a tensão efetiva é a responsável pelas variações físicas do solo. Entretanto, Feijó (1991) afirma que a premissa é cabível de discussão, pois pode existir uma variação no estado das tensões efetivas sem que ocorra uma variação de volume. É o que ocorre nos carregamentos não drenados.

2.1.2 Analogia mecânica para o processo de adensamento

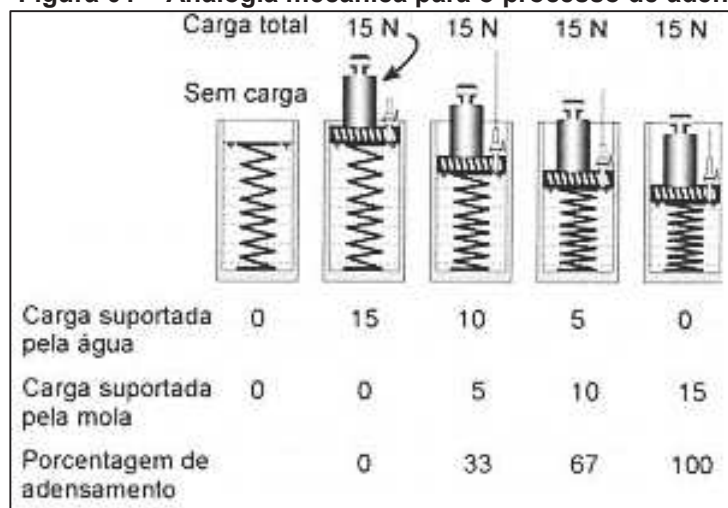
O adensamento, segundo Pinto (2006), é um fenômeno pelo qual os recalques ocorrem com a expulsão da água do interior dos vazios do solo ao longo do tempo. Assim, por meio da teoria de Terzaghi e Frölich (1936), pode-se entender como as tensões no solo variam durante o processo.

O objetivo da teoria do adensamento é determinar, em qualquer instante e em qualquer posição da camada de solo sujeita a um carregamento, qual é o grau de adensamento que esse solo iria se encontrar para uma determinada tensão, e quais seriam o índice de vazios, deformação e tensões efetivas que o solo iria apresentar para um determinado carregamento (PINTO, 2006).

Para o melhor entendimento da teoria do adensamento proposta por Terzaghi e Frölich (1936), também conhecida como a teoria clássica do adensamento, Pinto (2006) a explica utilizando a metodologia apresentada por Taylor (1948), na qual é considerado que a estrutura sólida de um solo é semelhante a uma mola. Na analogia, o solo saturado submetido a uma tensão é representado pelo conjunto mola, água,

êmbolo e pistão. Nesse esquema mecânico, o êmbolo apresentaria um orifício pelo qual a água seria dissipada lentamente, representando a permeabilidade do solo. O pistão representaria um elemento de distribuição de tensão, como por exemplo uma fundação e a mola seria a representação do solo. A Figura 01 ilustra o esquema mecânico abordado.

Figura 01 – Analogia mecânica para o processo de adensamento.



Fonte – Adaptado de Pinto (2006).

De acordo com Pinto (2006), ao se aplicar uma carga no pistão, quem irá suportar inicialmente essa carga será a água, pois ela é muito menos compressível do que a mola, portanto a mola não irá sofrer deformações iniciais. Contudo, a água tende a escoar para o lugar de menor pressão, gerando um fluxo para a parte externa do pistão, seguindo a lei de Darcy, pois o exterior encontra-se apenas com a pressão atmosférica. Conforme a água vai sendo expulsa do interior do êmbolo, a tensão que antes era suportada pela água vai passando gradativamente a ser suportada pela mola, e com isso a mola começa a ser comprimida. O processo continua até que a água seja expulsa por completa do pistão e conseqüentemente toda a carga seja suportada pela mola.

Segundo Pinto (2006), o que acontece em campo é algo muito semelhante a analogia proposta por Terzaghi. Como visto no princípio das tensões efetivas, existem a poropressão e a pressão efetiva. Da mesma forma que ocorre na mola, quando o solo é submetido a um acréscimo de tensão, inicialmente a poropressão é que fica responsável por suportar essa tensão. Com isso, a água tende a sair dos vazios do solo para aliviar esse aumento de tensão, tal fenômeno é chamado de adensamento

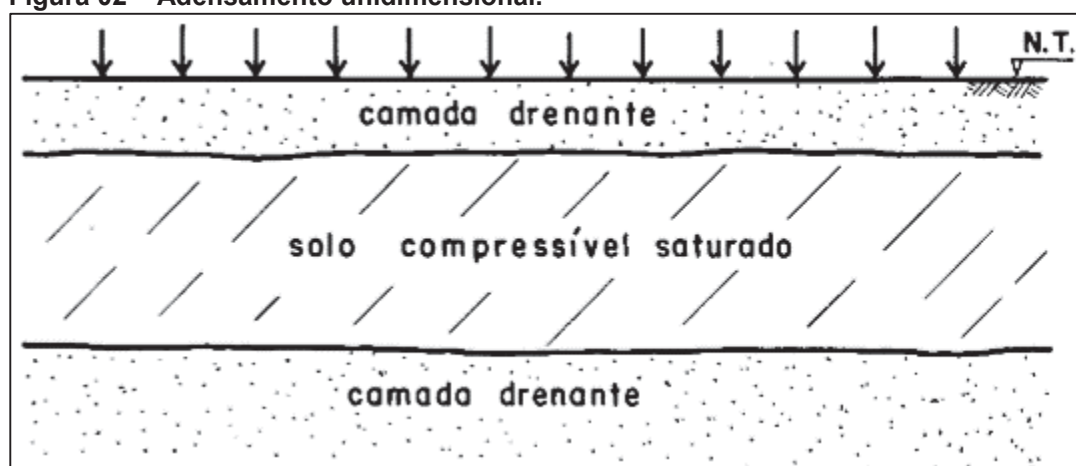
primário. Conforme a sobrepressão é dissipada, a tensão efetiva passa a sofrer os efeitos desse acréscimo de tensão, surgindo então os recalques primários.

2.1.3 Hipóteses da teoria do adensamento

Feijó (1991) explica que as considerações feitas por Terzaghi e Frölich (1936) para sua teoria de adensamento unidimensional tornam essa teoria bastante particular. Para a aplicação dessa teoria, o solo deve ter uma espessura constante, com uma superfície horizontal e carregamento vertical distribuído uniformemente na superfície do solo. Deve-se também, considerar apenas o adensamento em que as deformações e os fluxos ocorrem na direção vertical.

Segundo Feijó (1991), essa proposta de Terzaghi é encontrada em campo quando se constrói um aterro bastante extenso quando comparada com a espessura da camada de solo, podendo ser representada pela Figura 02.

Figura 02 – Adensamento unidimensional.



Fonte: Feijó (1991).

Terzaghi e Frölich propuseram algumas hipóteses com o intuito de simplificar o assunto, as quais são apresentadas e discutidas por Feijó (1991) e Aguiar (2008). Seguem as hipóteses propostas por Terzaghi e Frölich em sua teoria:

1) O solo é homogêneo;

Segundo Aguiar (2008), por mais que o solo seja formado pelos mesmos minerais, tal hipótese não se concretiza, pois quanto mais espessa a camada compressível do solo, maior a variação de tensões efetivas provocadas pelo peso próprio do solo, o que acarreta em uma variação dos índices de vazios ao longo da profundidade.

2) A compressão é unidimensional;

Para Feijó (1991), essa condição é válida para algumas situações particulares de campo, já em laboratório, essa é mais que uma hipótese: é uma condição.

3) O fluxo d'água é unidimensional;

Assim como a hipótese (2), Feijó (1991) considera válida para algumas situações em campo e uma condição obrigatória em laboratório.

4) O solo é totalmente saturado;

Segundo Aguiar (2008), essa quarta hipótese é bastante representativa em solos sedimentares, como a argila mole, sendo esses solos conectados com a maioria dos problemas de adensamento. Isso ocorre porque estes solos formam-se comumente em regiões alagadas (AGUIAR, 2008).

5) A água e os grãos sólidos são incompressíveis;

Feijó (1991) afirma que essa hipótese se aproxima muito da realidade, relatando que a compressibilidade do esqueleto sólido da argila do Sarapuí é da ordem de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{kN}$, já a compressibilidade da água é na ordem de $10^{-7} \text{ m}^2/\text{kN}$, mostrando dessa forma que a água realmente é menos compressível que o solo.

6) O solo pode ser estudado como elementos infinitesimais, apesar de ser constituído de partículas e vazios;

Para Aguiar (2008), essa hipótese está ligada apenas com o elemento infinitesimal utilizado para deduzir a equação diferencial que modela esse fenômeno. Taylor (1948) diz que essa proposta é de interesse apenas acadêmico.

7) O fluxo é governado pela Lei de Darcy;

Segundo Aguiar (2008), essa hipótese é aceita, entretanto deve-se estudar a validade dessa lei para gradientes muito elevados ou muito baixos.

8) As propriedades do solo não variam no processo de adensamento; e

Para Feijó (1991), essa hipótese levanta algumas discussões, já que essa leva como premissa que os índices de vazios se manteriam constantes durante o adensamento, e conseqüentemente os caminhos de drenagem também se manteriam constante, o que não torna a hipótese muito realista. Entretanto, Feijó (1991) acrescenta que mesmo com essa consideração as curvas experimentais de deformação *versus* tempo se assemelham, até um determinado ponto, às curvas teóricas dadas pela teoria de Terzaghi.

9) O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento.

Segundo Taylor (1948), essa hipótese é a que mais limita a teoria e a única explicação para Terzaghi ter feito isso foi para simplificar a solução matemática. Segundo Aguiar (2008), a relação entre índice de vazios e tensão vertical, para solos de alta plasticidade, não pode ser representada por uma reta, pois o tempo de carregamento e a velocidade de deformação específica interferem nessa relação. Essa discordância fez com que existissem algumas diferenças entre as curvas deformação *versus* tempo experimentais e teóricas no trecho do recalque secundário (FEIJÓ, 1991).

Segundo Nogueira (2010), foi com base nas hipóteses apresentadas acima que Terzaghi e Frölich (1936) apresentaram a equação do adensamento representada pela equação 2.2.

$$\frac{K_V \cdot (1 + e)}{a_V \cdot \gamma_W} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.2)$$

Onde:

- K_V = coeficiente de permeabilidade vertical;
- e = índice de vazios;
- a_V = coeficiente de compressibilidade;
- γ_W = peso específico da água; e
- u = poropressão.

Nogueira (2010) afirma que o primeiro membro da equação (2.2) é denominado coeficiente de adensamento (C_V) e reflete as características apresentadas pelo solo. Pinto (2006) complementa dizendo que a adoção desse coeficiente como uma constante do solo segue os preceitos impostos pela hipótese 8 de Terzaghi e Frölich (1936). Substituindo a primeira parte pelo coeficiente de adensamento, tem-se:

$$C_V \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.3)$$

Feijó (1991) mostra que existem três condições de contorno para a resolução do problema a cima:

- (1) Para $z = 0$; $u = 0$, para qualquer $t > 0$
- (2) Para $z = 2H$; $u = 0$, para qualquer $t > 0$
- (3) Para $t = 0$; $u = u_0$, para $0 \leq z \leq 2H$

A resolução da equação diferencial parcial (2.3) levando-se em conta as condições de contorno a cima, fornece a seguinte expressão:

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \cdot \left(\text{sen} \frac{M \cdot z}{H_d} \right) \cdot e^{-M^2 \cdot T}, \text{ com } M = \frac{\pi}{2} (2 \cdot m + 1) \quad (2.4)$$

Onde:

- U_z = Grau de adensamento localizado.
- T = Fator Tempo de drenagem

Pinto (2006) explica que T é o Fator Tempo que correlaciona os tempos de recalque e as características do solo com o coeficiente de adensamento, e as condições de drenagem com a altura máxima de drenagem. O qual é dado pela equação (2.5).

$$T = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} \quad (2.5)$$

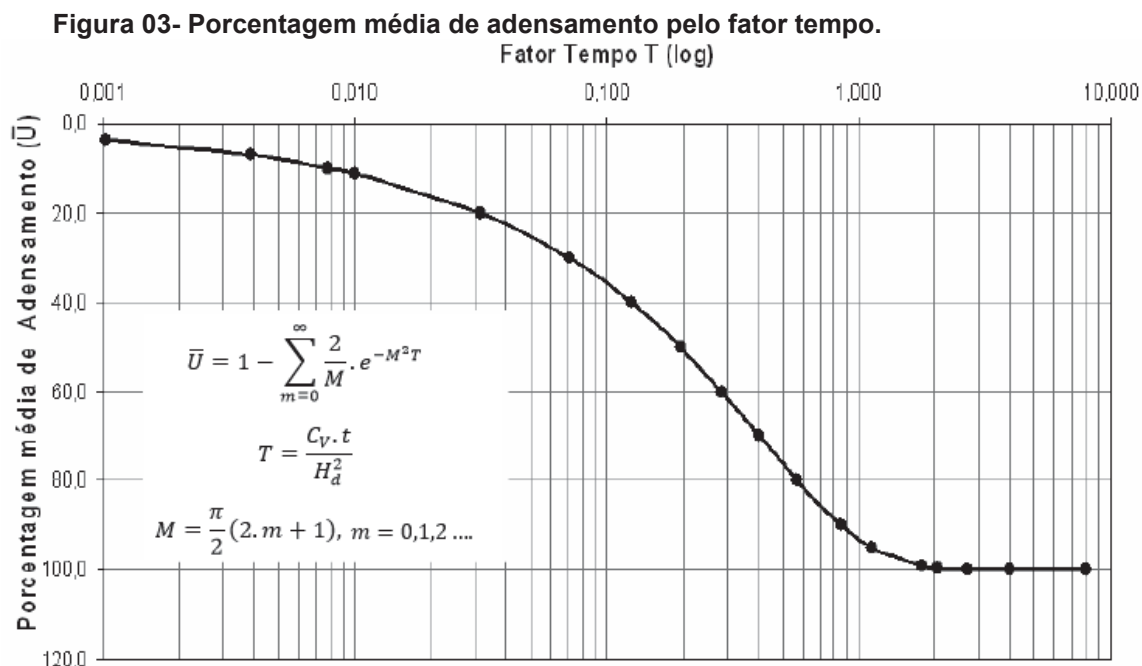
- H_d = Distância de drenagem;
- t = Tempo; e
- C_v = Coeficiente de adensamento.

A equação 2.4 expressa o resultado do grau de adensamento em uma determinada altura do perfil de solo, entretanto, Pinto (2006) ressalta que o adensamento não ocorre de maneira uniforme ao longo de toda a profundidade. Nas proximidades da extremidade de drenagem, as pressões neutras se dissipam mais rapidamente.

Portanto, para descobrir o grau de adensamento para um determinado recalque na superfície do terreno, deve-se fazer a média dos graus de adensamento localizados ao longo da profundidade (PINTO, 2006). A expressão (2.6) demonstra o grau de adensamento médio.

$$\bar{U} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \cdot e^{-M^2 T} \quad (2.6)$$

Sendo a equação (2.6) a representação da solução analítica do problema, podendo essa ser representada de forma gráfica (ANDRADE, 2009), a qual é representada pela Figura 03.



Fonte – Andrade (2009).

Sendo que essa solução gráfica, representada pela Figura 03, é denominada de curva teórica do adensamento.

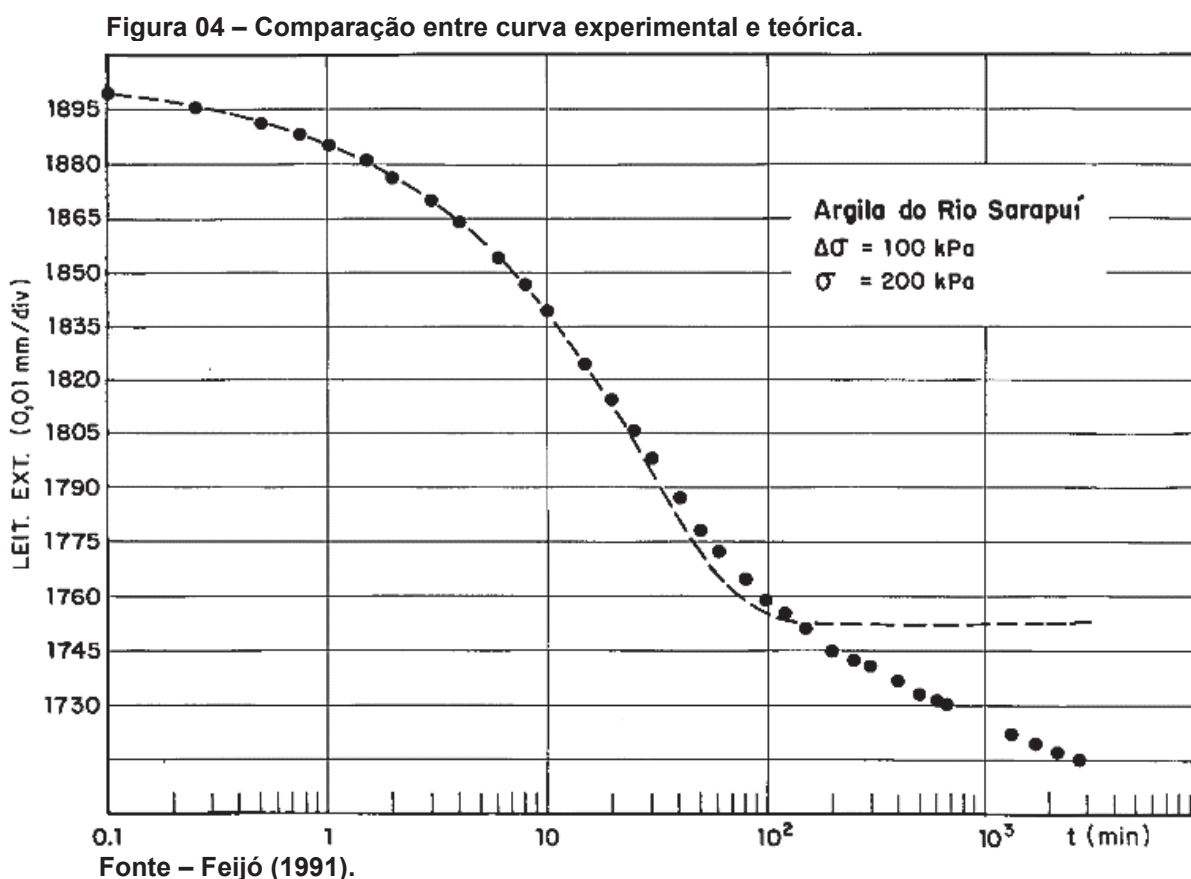
2.1.4 Comparação entre as curvas teórica e experimental

Segundo Taylor (1948), quando se compara curvas de adensamento teóricas com curvas experimentais em uma relação de tempo natural, percebe-se que as duas são muito similares. No entanto, Taylor (1948) afirma que nem sempre a escala natural de tempo é a melhor opção para comparar as duas situações.

Para a melhor análise entre as duas curvas, Taylor (1948) faz o uso de duas escalas diferentes, utilizou nas abscissas a raiz quadrada do tempo em uma, e uma escala logarítmica do tempo na outra. Com isso, pode-se perceber que, inicialmente, as duas curvas apresentavam resultados bastantes satisfatórios. Entretanto, o mesmo não se aplicava para o fim da curva de adensamento, tendo muitos resultados divergentes.

Em sua tese, Feijó (1991) relata uma comparação da curva teórica de Terzaghi e a curva experimental da argila do Rio Sarapuí (RJ), sendo possível observar que até cerca de 60% de adensamento, as curvas apresentam uma boa

acurácia entre si. Feijó (1991) relata que depois de 60% de adensamento, a curva teórica, representada pela curva tracejada na Figura 04, apresenta uma mudança de curvatura formando uma assíntota horizontal, indicando o fim das deformações, enquanto a curva experimental, representada pela curva pontilhada na Figura 04, apresenta uma inclinação, indicando que os recalques continuavam ocorrendo.



De acordo com Feijó (1991), para o trecho final da curva experimental, não se pode mais atribuir a evolução dos recalques ao fenômeno de adensamento exposto na teoria de Terzaghi e Frölich (1936). A esta compressão dá-se o nome de compressão secundária (FEIJÓ, 1991).

2.2 ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

Segundo Andrade (2009), o fenômeno de adensamento secundário foi levado em pauta com mais intensidade após o Primeiro Congresso Internacional de Mecânica

dos Solos e Engenharia de Fundações, realizado no ano de 1936 em Harvard. Pois foi nesse congresso a primeira tentativa de quantificar a evolução do adensamento secundário com o tempo.

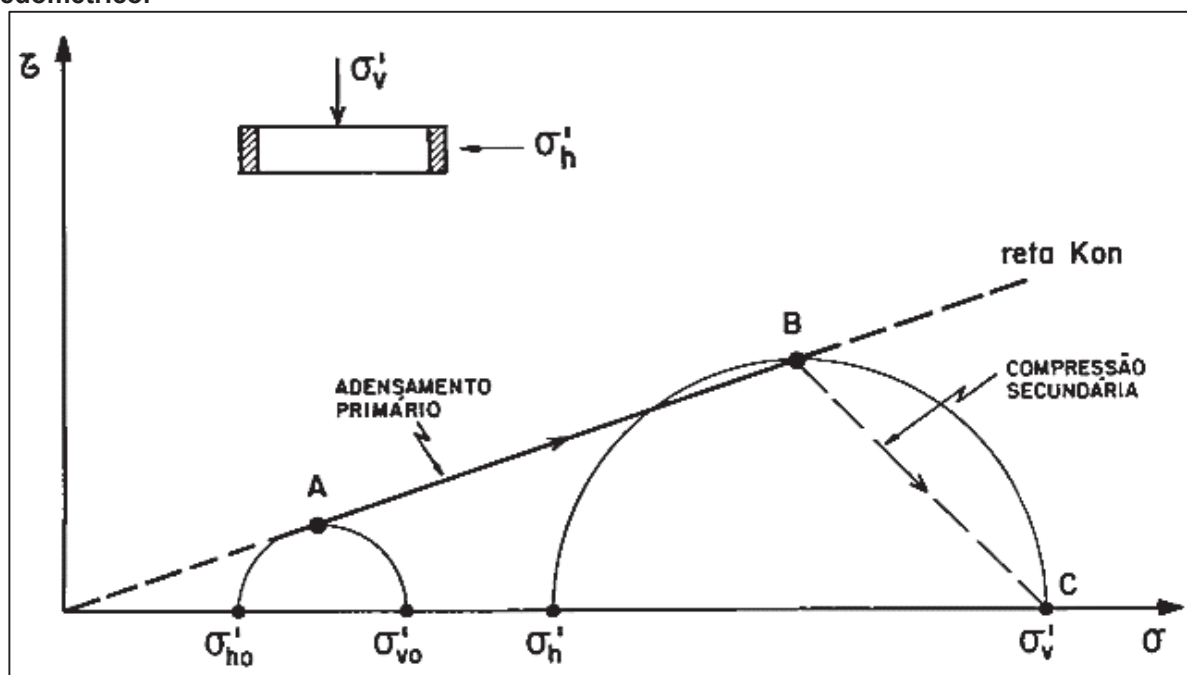
Brasil (2015) ressalta em seu trabalho que quanto ao assunto de adensamento secundário ainda existem muitas divergências, tanto nas definições, quanto nos modelos físicos que se propõem entendê-la. Entretanto, existe um consenso entre todos os autores, quanto à importância de se computar os recalques gerados pelo adensamento secundário, principalmente para solos argilosos com bastante matéria orgânica, os quais podem gerar diferenças de recalques expressivos caso não computados.

De acordo com Feijó (1991) a definição mais simples para o adensamento secundário é que ele é um fenômeno que mesmo após o excesso de poropressão ter se dissipado, ou seja, quando o solo apresenta uma tensão efetiva constante, esse ainda apresenta um decréscimo de volume com o tempo. O que acaba contradizendo o princípio das tensões efetivas de Terzaghi, abordado no tópico 2.1.1. Para Aguiar (2008), tal divergência ocorre, pois a teoria clássica contempla apenas as deformações devido a dissipação dos excessos de poropressão, ou seja, as devido um carregamento externo.

Já Lacerda e Martins (1985 apud DOMINGOS, 2008, p. 65) apresentaram uma teoria dizendo que o adensamento secundário acontece devido à dissipação da tensão cisalhante, gerando um aumento da tensão efetiva horizontal, sendo que a tensão efetiva vertical se mantém constante. Segundo Domingos (2008) essa abordagem acaba se encaixando dentro do princípio das tensões efetivas de Terzaghi (1936).

Garcia (1996) explica melhor a teoria apresentada por Lacerda e Martins, dizendo que inicialmente, durante o adensamento primário, o coeficiente K_0 (coeficiente de empuxo no repouso), também denominado K_{on} , manteria-se constante, portanto o caminho de tensões efetivas representada por um ensaio edométrico, seria dado pelo trecho AB da Figura 05. No ponto B, Lacerda e Martins (1985 apud GARCIA, 1996, p. 19) afirma que a tensão efetiva vertical não sofreria mais variação, portanto caso ocorresse uma relaxação de tensões, a única forma disso acontecer seria com o aumento da tensão efetiva horizontal, o que por consequência aumentaria o coeficiente K_0 , fazendo o caminho de tensões efetivas seguir pelo trecho BC da Figura 05.

Figura 05 – Caminho de tensões efetivas de uma amostra normalmente adensada em um ensaio edométrico.



Fonte – Feijó (1991).

Dessa forma, seguindo os princípios da teoria de Lacerda e Martins, Garcia (1996) afirma que o adensamento secundário está interligado com a resistência viscosa, conforme ocorre a diminuição da velocidade de deformação, a resistência viscosa decresce, provocando a dissipação das tensões cisalhantes, o aumento do K_0 e da tensão efetiva octaédrica.

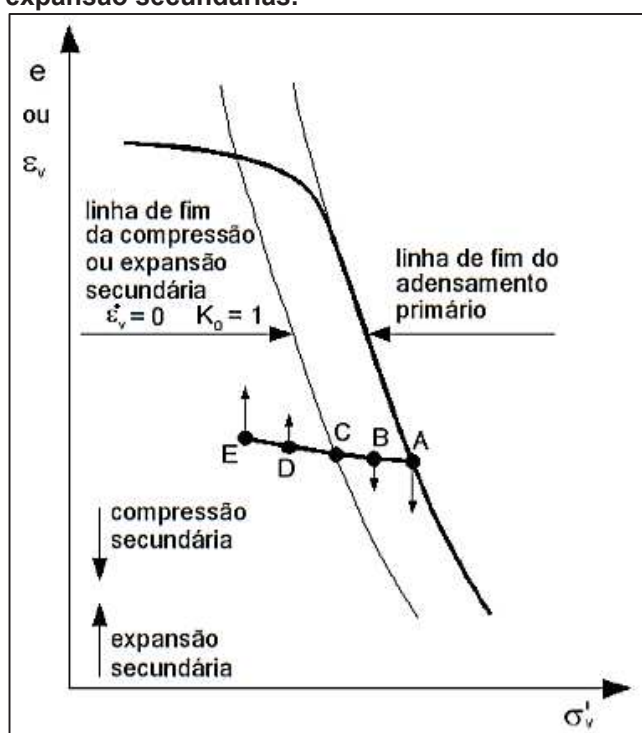
Lacerda e Martins (1985 apud GARCIA, 1996, p. 20) acrescentaram que o fim do adensamento secundário ocorre após a dissipação das tensões cisalhantes. Nesse momento, o K_0 voltaria a ser igual a uma unidade. Com isso, Garcia (1996) afirma que pode-se chegar em algumas relações entre o OCR com o adensamento secundário e o K_0 . Se o OCR de um determinado solo fosse tal que o $K_0 < 1$, a tensão efetiva horizontal sofreria um aumento, até se igualar com a tensão efetiva vertical, para voltar a estabilidade, ou seja K_0 voltaria ser igual a uma unidade, o que resultaria no aumento da tensão efetiva octaédrica (GARCIA, 1996). Para um OCR que o $K_0 > 1$, o mesmo autor explicou que, a tensão efetiva horizontal sofreria uma redução, até se igualar com a tensão efetiva vertical, fazendo o K_0 voltar a ser igual a uma unidade, gerando uma diminuição da tensão efetiva octaédrica.

De acordo com Garcia (1996), para um solo cujo o OCR é tal que o $K_0 < 1$, poderia ser representado por um descarregamento em um corpo de prova, esse

descarregamento provocaria inicialmente uma expansão primária seguido de uma recompressão, tal recompressão é denominada adensamento secundário. Já para o segundo caso, com um solo apresentando um OCR tal que o $K_0 > 1$, um descarregamento em um corpo de prova provocaria uma expansão secundária após a expansão primária gerada pelo descarregamento (GARCIA, 1996). A demonstração gráfica dessas relações podem ser observadas na Figura 06.

Feijó (1991) em seu estudo da argila do Rio Sarapuí (RJ), realizou ensaios edométricos de longa duração, sendo que um dos intuitos de seu estudo era estabelecer uma relação entre a compressão secundária, OCR e o K_0 . O referido autor obteve valores de OCR que se encaixariam nos pontos A, B, C, D, E da Figura 06. Sendo que os pontos A e B, são pontos que têm tendência a ocorrência de compressão secundária. O ponto C teria uma tendência de não apresentar variações de deformações, mantendo-se constante. Já os pontos D e E apresentariam uma expansão secundária. Feijó (1991) demonstra a existência da linha de fim de adensamento secundário. Sendo assim, o solo que apresentar deformações consideráveis devido o adensamento secundário, sempre irá procurar “caminhar” até a linha de fim de compressão secundário. Como é demonstrado pela Figura 06

Figura 06 – Relação entre e (ou ε_v) x σ'_v considerando a compressão e expansão secundárias.



Fonte – Domingos (2008).

Estudos mais recentes do Grupo de Reologia da COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia) demonstram que a linha do fim do secundário, assim como o adensamento secundário, está intimamente ligado com a viscosidade da água ao entorno dos minerais de solo, denominada, água adsorvida. O adensamento secundário seria portanto a dissipação dessa água.

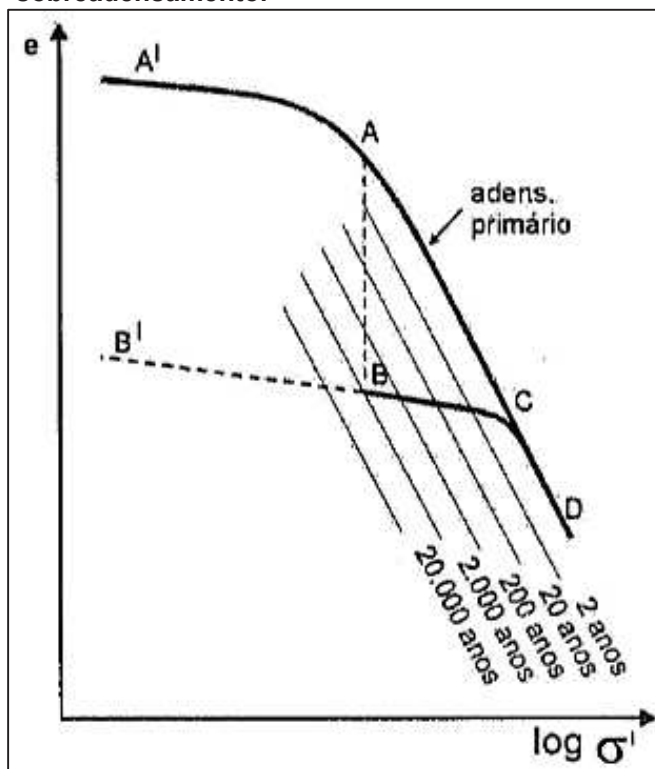
Além disso, o referido Grupo, ressalta que para chegar na linha de fim do secundário, toda a água adsorvida deve ser dissipada. A referida linha corresponde ao par de pontos $(\sigma'_v; \varepsilon_v)$, para a qual a velocidade de deformação é nula ($\dot{\varepsilon}_v = 0$).

2.2.1 Influência do adensamento secundário na tensão de sobreadensamento

Os solos podem se comportar como normalmente adensados sobreadensados. Um solo está normalmente adensado quando a sua tensão de pré – adensamento é a própria tensão efetiva que o solo está submetido, já quando o solo é sobreadensado a tensão efetiva que o mesmo se encontra é de menor valor do que a tensão de pré adensamento. Ou seja, a tensão de pré – adensamento é a maior tensão que o solo já esteve submetido. Entretanto, Pinto (2006) afirmou que quando analisada a tensão de pré – adensamento em relação ao adensamento secundário existe uma complexidade no conceito de tensão de sobreadensamento, a qual será mostrada a seguir.

O adensamento secundário constitui uma redução dos índices de vazios sob tensão efetiva constante (PINTO, 2006). Esse fenômeno pode ser observado com a análise da Figura 07.

Figura 07 – Influência do adensamento secundário na tensão de sobreadensamento.



Fonte – Pinto (2006).

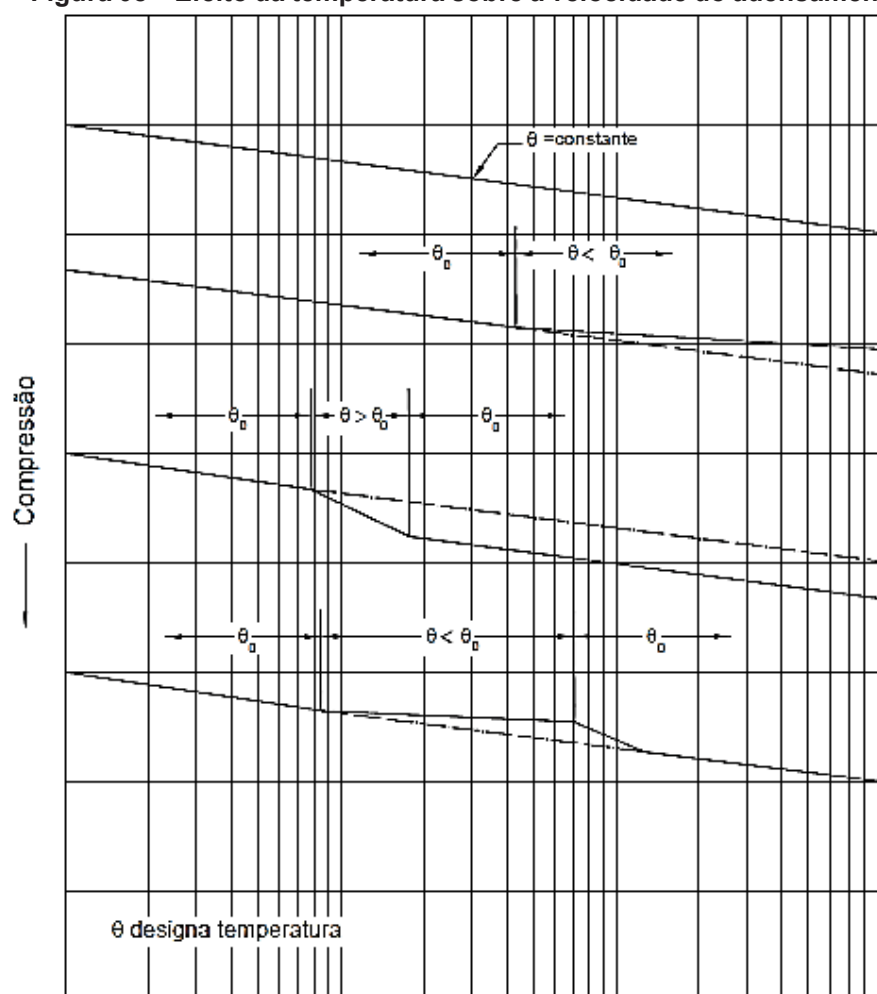
Segundo Pinto (2006), quando um solo está situado no ponto A, passados 2.000 anos, o solo terá sofrido a ocorrência do adensamento secundário, conseqüentemente seu índice de vazios terá diminuído, e por conta disso o ponto que passa a representar a situação do solo é o ponto B. Nesse ponto, o solo estará numa condição sobreadensada.

Se o solo for submetido a um carregamento, o solo apresentará uma variação de índices de vazios segundo a curva BCD. Para essa curva, a tensão de pré-adensamento é representado pelo ponto C. Entretanto, o solo se encontrava inicialmente no ponto A, com características de um solo normalmente adensado, ou seja, sua tensão de pré-adensamento era o próprio ponto A. Portanto, o adensamento secundário faz surgir uma tensão de sobreadensamento no solo (PINTO, 2006).

2.2.2 Influência da temperatura no adensamento secundário

Segundo Andrade (2009), a muito tempo já se sabe que a temperatura influencia o comportamento dos solos. Em seus estudos, Gray (1936 apud ANDRADE, 2009, p.53), observou que se houvesse uma variação da temperatura durante um ensaio de adensamento secundário, a velocidade desse também variava, ilustrado pela Figura 08.

Figura 08 – Efeito da temperatura sobre a velocidade do adensamento secundário.



Fonte – (Gray, 1936 apud ANDRADE, 2009, p.53).

Observando a Figura 08, pode-se notar que quando aumentado a temperatura, a compressão ocorre com maior intensidade, evidenciando um aumento da velocidade do adensamento secundário. Na situação contrária, quando a temperatura diminui, a velocidade do adensamento secundário também diminui.

Paaswell (1967 apud ANDRADE, 2009, p. 54), afirma que a influência da temperatura no adensamento secundário, está intimamente ligado com a viscosidade da água, pois a viscosidade se dá em função da temperatura. Vale-se ressaltar que o adensamento secundário ocorre com a expulsão de água adsorvida do interior dos grãos de solo, quanto menos viscosa for a água, mais fácil de ocorrer o adensamento secundário.

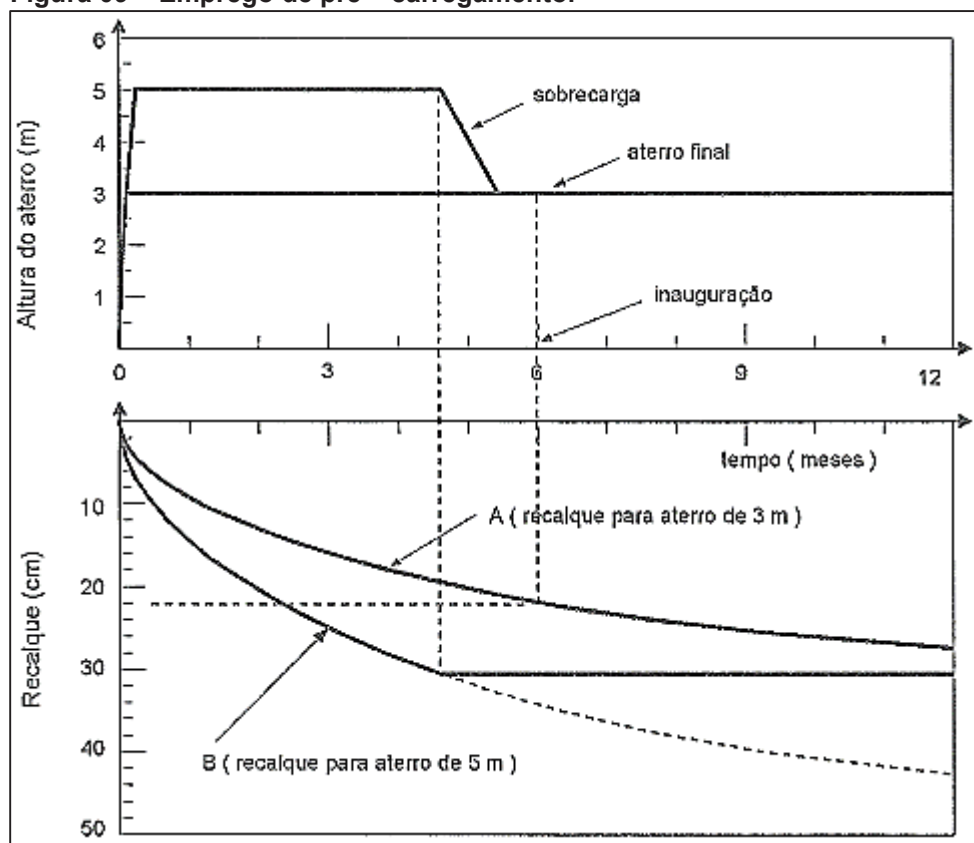
Passwell (1967 apud ANDRADE, 2009, p.54) constatou que o aumento da temperatura diminui a viscosidade da água adsorvida aos grãos, portanto, aumentaria a velocidade de deformação no adensamento secundário.

2.2.3 Emprego de pré – carregamento para reduzir recalques futuros

Uma aplicação prática do estudo de adensamento, primário e secundário, segundo Pinto (2006), é a antecipação dos recalques devido a uma sobrecarga temporária. Nogueira (2010) diz que essa técnica consiste em adensar a camada compressível do solo, de forma que o solo sofra deformações esperadas durante a sua vida útil em menores espaços de tempo.

Para entender melhor como funciona essa técnica, Pinto (2006) mostra um exemplo da construção de um aterro para dar acesso a uma ponte. Nesse exemplo, a obra teria que ser entregue em seis meses e o aterro teria 3 m de altura. Foi constatado que ao fim do sexto mês, prazo final da entrega da obra, o solo teria recalcado 22 cm, mas ainda restaria 8 cm para recalcar, o que provocaria um desnivelamento do aterro em relação ao tabuleiro da ponte. Entretanto, se fosse construído um aterro de 5 m, esse aterro sofreria em quatro meses um recalque de 30 cm, e quando fosse retirada a sobrecarga de 2 m de cima do aterro, os recalques estariam cessados. A Figura 09 ilustra graficamente o exemplo em questão.

Figura 09 – Emprego de pré – carregamento.

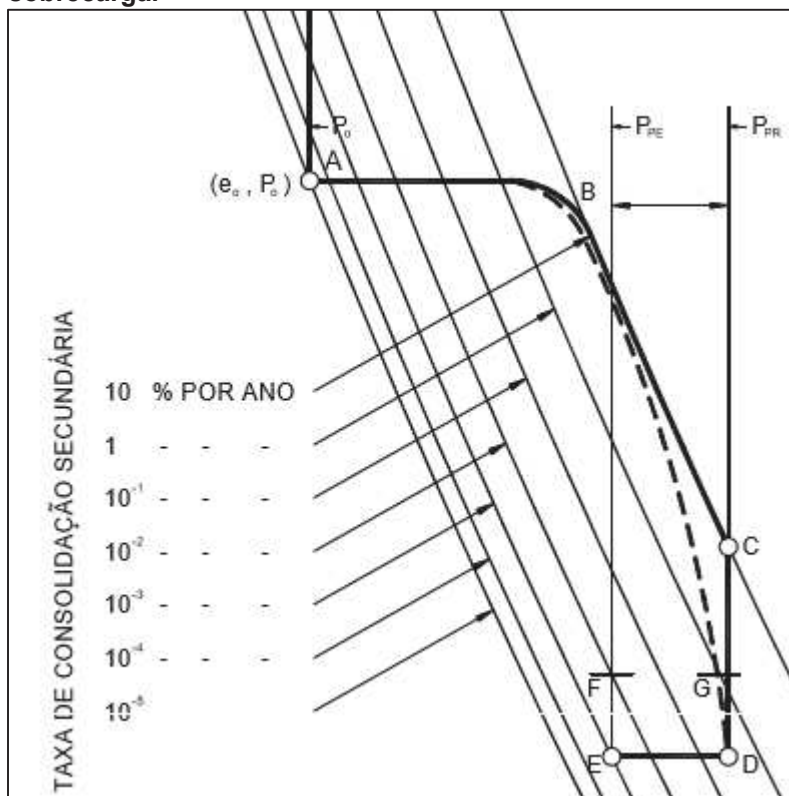


Fonte: Pinto (2006).

Nogueira (2010) afirma que essa técnica surte efeitos também em recalques secundários. A Figura 09 representa uma argila que é carregada por um carregamento permanente e uma sobrecarga. Segundo Nogueira (2010), a variação do índice de vazios com a tensão efetiva vertical é representada pela curva ABCDE, a parcela ABC representa o aumento da tensão efetiva e a redução do índice de vazios devido ao adensamento primário, e a reta CD ilustra a redução do índice de vazios provocado pelo adensamento secundário.

Segundo Nogueira (2010), observando a Figura 10, pode-se entender como o fenômeno do adensamento secundário se comporta na presença de uma sobrecarga.

Figura 10 – Desenvolvimento dos recalques na presença de uma sobrecarga.



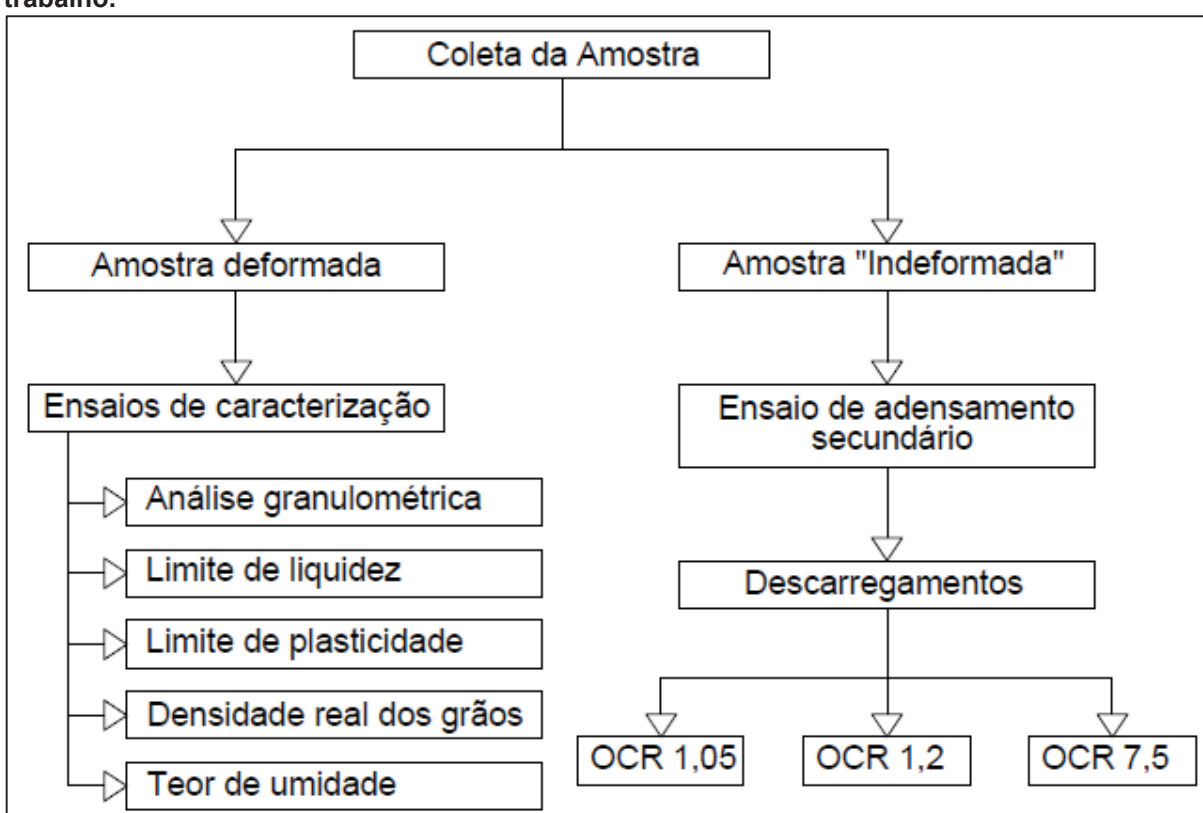
Fonte – Adaptado de Nogueira (2010).

Antes da retirada da sobrecarga, a taxa de adensamento secundário era representada pelo ponto D, tendo uma taxa de aproximadamente 0,5% por ano de adensamento secundário. A redução da tensão efetiva vertical com a retirada da sobrecarga causou a redução da taxa de adensamento secundário para aproximadamente 0,001% ao ano, representado pelo ponto E. Com isso Nogueira (2010) concluiu que devido à sobrecarga, a taxa de adensamento secundário diminuiu em 10 vezes

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão mostrados quais foram os procedimentos para a coleta das amostras, bem como as descrições para cada ensaio realizado durante esse trabalho. O fluxograma a seguir (Figura 11), apresenta de forma esquemática as etapas que foram seguidas para o desenvolvimento desse trabalho.

Figura 11 – Fluxograma esquemático das etapas a serem seguidas no desenvolvimento do trabalho.



Fonte – Autoria própria.

Vale-se ressaltar que a amostra de solo foi coleta pela acadêmica Marylise Cataneo, já os ensaios de caracterização, foram realizados em conjunto. Sendo que o corpo de prova utilizado para o ensaio de adensamento secundário foi reutilizado do ensaio de colapsividade de Cataneo (2017).

3.1 LOCAL DE COLETA DA AMOSTRA DE SOLO

Segundo Cataneo (2017), a amostra de solo foi retirada no terreno da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo com as seguintes coordenadas geográficas: S 24° 43' 59,9", W 53° 45' 58,6". O local da retirada é ilustrado pela Figura 12, sendo que para obter com precisão as coordenadas, foi usado um GPS da marca GARMIN 64 sc.

Figura 12 – Local da retirada das amostras de solo.



Fonte – Google Earth.

3.2 RETIRADA DA AMOSTRA

As amostras coletadas foram de dois tipos “indeformada” e deformada. Isso se dá pelo fato de que para o ensaio de adensamento secundário, o corpo de prova necessariamente deve ser “indeformado”. Já os ensaios de caracterização do solo

não necessitam dessa particularidade, podendo, dessa forma, utilizar um corpo de prova deformado.

3.2.1 Amostra “indeformada”

Segundo Cataneo (2017), foi necessário dois anéis para a retirada do material: um anel biselado e um centralizador, de aço inoxidável, conforme a Figura 13.A. Além dos anéis, foi utilizado um peso adaptado que serviu como material auxiliar para a realização da coleta da amostra, o qual Cataneo (2017) denominou-o como cravador (Figura 13.B). Todos os materiais que foram utilizados fazem parte do laboratório de solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo.

Figura 13 – (A) Anel centralizador e anel biselado. (B) Cravador.



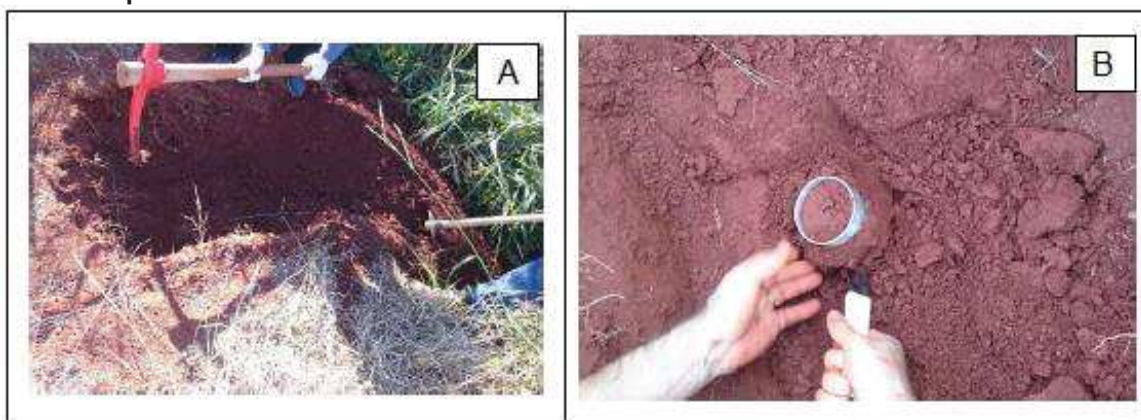
Fonte – Cataneo (2017)

Segundo Cataneo (2017), o processo da retirada do corpo de prova indeformado aconteceu da seguinte maneira: primeiramente foi feita uma limpeza da região, retirando toda a matéria orgânica do local. Feito isso, escavou-se com o auxílio

de uma picareta aproximadamente 0,7 m de profundidade, conforme a Figura 14.A. Uma vez na cota desejada, foi cravado o anel biselado diretamente no solo, para a realização dessa etapa, utilizou-se o cravador, posicionando-o em cima do conjunto e fazendo uma força axial de compressão, com o intuito de crava-los no solo. Os anéis foram colocados sobrepostos e unidos, de forma que o anel centralizador encontrava-se sobre o anel biselado, conforme mostrado na Figura 13.A. Utilizando-os sobrepostos dessa forma, evitou-se a compactação da amostra durante a sua coleta.

Eles foram cravados até que o anel biselado ficasse totalmente preenchido de solo (Figura 14.B). Feito isso, a amostra juntamente com os anéis, foram sacadas, embaladas em um filme de PVC ainda em campo, e levadas para o laboratório, tomando todos os devidos cuidado para que durante o caminho, a amostra sofresse o mínimo de deformação possível (CATANEO, 2017).

Figura 14 – (A) Escavação até a cota 0,7 m. (B) Processo de retirada dos anéis, com o anel biselado preenchido de solo.



Fonte – Cataneo (2017)

No laboratório, foi feito o arrasamento do solo contido no anel biselado, conforme a Figura 15, sendo que uma porção desse material foi utilizado para a determinação do teor de umidade do corpo de prova. O restante da amostra contida no anel, foi utilizada no ensaio de adensamento secundário.

Figura 15 – Amostra de solo rasada do anel biselada



Fonte – Cataneo (2017).

Cataneo (2017) ressalta que essa forma de retirada da amostra indeformada é uma adaptação criada com o intuito de diminuir o custo e facilitar a retirada da amostra.

3.2.2 Amostra deformada

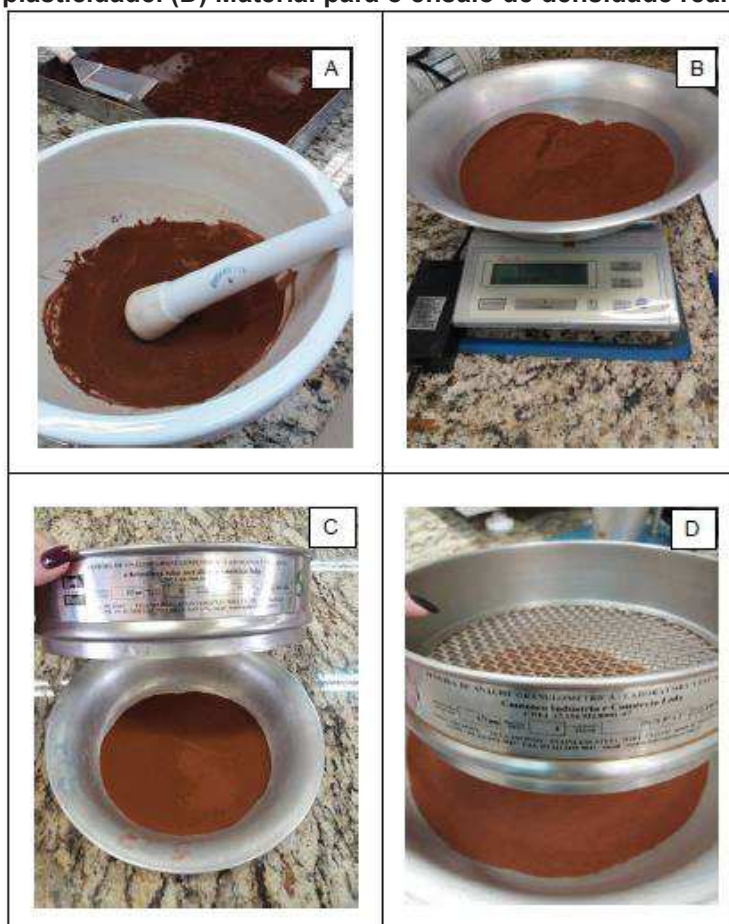
Segundo Cataneo (2017) o material utilizado no corpo de prova deformado, foi retirado no mesmo local e mesma profundidade do que a amostra “indeformada”. Sendo que essa etapa foi feito com o auxílio de uma pá, tomando sempre o cuidado para excluir raízes do material.

Após a retirada, a amostra foi colocada em um bandeja e transportada para o laboratório de solos da UTFPR-TD. Uma vez no laboratório, o material foi deixado em cima de uma bancada a fim de se atingir a umidade higroscópica. Esta amostra foi utilizada para os ensaios de caracterização

3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Como dito anteriormente, a amostra utilizada para essa etapa foi a deformada, sendo que antes de iniciar os ensaios, esse material passou por uma secagem prévia ao ar, deixando a umidade da amostra próxima da higroscópica. Feito isso, colocou-se o material em um almofariz, onde foi feito o processo de destorroamento da amostra, conforme a Figura 16.A.

Figura 16 – (A) Amostra destorroadada. (B) Material para o ensaio de análise granulométrica. (C) Material para os ensaios de limite de liquidez e plasticidade. (D) Material para o ensaio de densidade real dos grãos.



Fonte – Cataneo (2017).

Para o ensaio de análise granulométrica, tomou-se 988,55 gf de material passado na peneira de 76 mm, conforme a Figura 16.B. Já para os ensaios de limite de liquidez e plasticidade, foi utilizado 189,16 gf de material passado na peneira de 0,425 mm (Figura 16.C). E para o ensaio de densidade real dos grãos, utilizou-se 493,73 gf de material passado na peneira de 4,75 mm, conforme a Figura 16.D.

3.3.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica possibilita a classificação da amostra de acordo com o diâmetro das partículas que constituem o material de solo. Normalmente esse ensaio é dividido em três etapas: peneiramento grosso, fino e sedimentação.

Para o peneiramento grosso, peneirou todo o material (988,55 gf) na peneira de nº10 (2,0 mm), sendo que a porcentagem retida, foi utilizada para o peneiramento grosso, no caso dessa amostra, apenas 0,12 gf ficaram retidos. Posteriormente, agitou-se esse material em um conjunto de peneiras (Figura 17), conforme preconiza a NBR 7181/16.

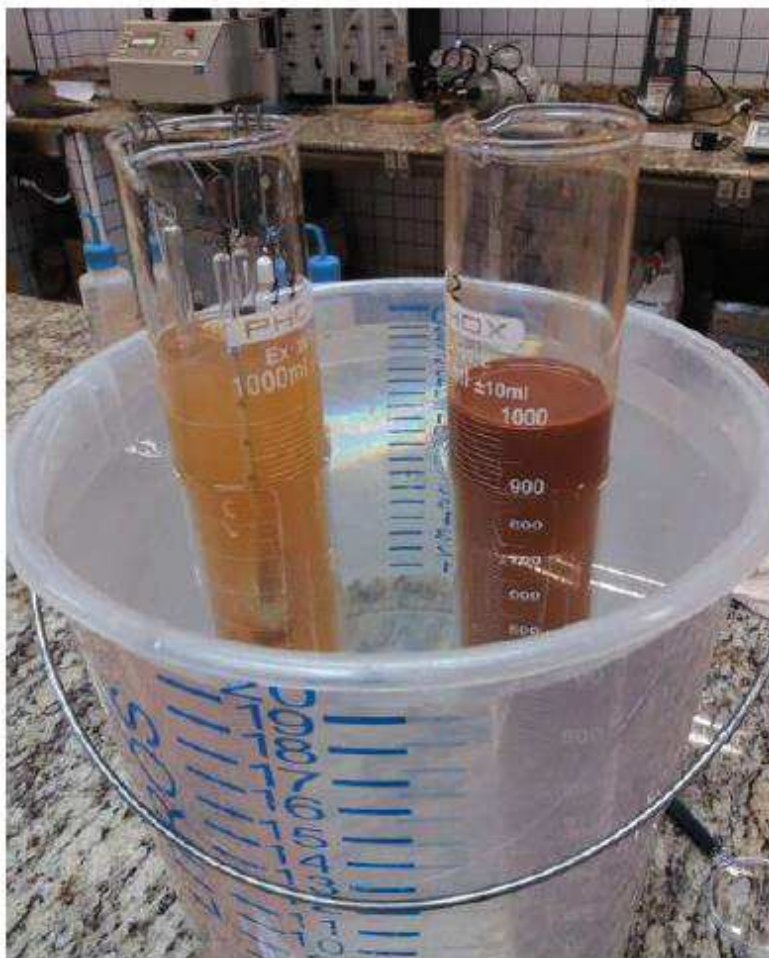
Figura 17 – Conjunto de peneiras utilizadas para o peneiramento grosso.



Fonte – Cataneo (2017).

Através do ensaio de sedimentação, foi possível classificar as partículas de solo com diâmetro inferior a 0,075 mm. Como essa amostra era visivelmente argilosa, utilizou-se apenas 70,22 gf do material passante na peneira de 2,0 mm para a realização desse ensaio. Todos os procedimentos foram feitos conforme a NBR 7181/16 preconiza. A Figura 18 mostra alguns materiais utilizados para o ensaio de sedimentação.

Figura 18 – Ensaio de sedimentação.



Fonte – Cataneo (2017).

Após a etapa anterior, foi realizado o ensaio de peneiramento fino utilizando a amostra proveniente da sedimentação. Tal material foi vertido na peneira de 0,075 mm e lavado em água corrente. Após a secagem desse material foi realizado o ensaio de peneiramento fino, com as mesmas diretrizes do peneiramento grosso, agitando a amostra de 2,67 gf em um conjunto de balanças conforme a NBR 7181/16 preconiza.

3.3.2 Limite de Liquidez

Primeiramente, acrescentou-se pequenos incrementos de água destilada na amostra e mexeu-a vigorosamente, de forma que todo o material fosse homogeneizado. Após essa etapa, foi transferida parte dessa mistura para a concha do equipamento de Casagrande, ilustrado pela Figura 19, de forma que na parte

central a espessura de solo fosse na ordem de 10 mm, e com o auxílio de um cinzel, foi dividido a massa de solo em duas, gerando uma ranhura na parte central da concha.

Após isto, aplicou-se repetidos golpes com queda de altura de 10 mm e velocidade constante. Após a ranhura se fechar ao longo de aproximadamente 13 mm, foi anotado o número de golpes e repetiu-se o procedimento até a obtenção de cinco pontos.

Uma vez com todos os pontos em mãos, plotou-se um gráfico de número de golpes *versus* teor de umidade, ajustando uma reta entre esses pontos. Sendo que o limite de liquidez do solo corresponde ao valor do teor de umidade aos 25 golpes.

Figura 19 – Aparelhagem utilizada para o ensaio de limite de liquidez.



Fonte – Cataneo (2017).

Este ensaio foi realizado conforme as preconizações da norma ABNT NBR 6459/84 “Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de Ensaio”.

3.3.3 Limite de Plasticidade

O ensaio de Limite de Plasticidade (LP), consiste em moldar um cilindro de aproximadamente, 3,0 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, de forma que a amostra se fratura quando moldada com as dimensões anteriores.

Para realizar esse ensaio, acrescentou-se pequenos incrementos de água destilada na amostra e mexeu-a vigorosamente, de forma que todo o material fosse homogeneizado. Após isto, a amostra foi moldada manualmente em cima de uma placa de vidro. Esse procedimento foi repetido até obter cinco valores de umidades.

Os equipamentos utilizados para a realização desse ensaio podem ser vistos na Figura 20.

Figura 20 – Materiais utilizados para o ensaio de limite de plasticidade.



Fonte – Cataneo (2017).

O valor do limite de liquidez foi obtido através da média das cinco umidades encontradas, sendo que o resultado foi considerado satisfatório quando a umidade não se diferenciava mais de 5 % do seu valor médio.

Este ensaio foi realizado seguindo as recomendações da norma NBR 7180/84 “Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio”.

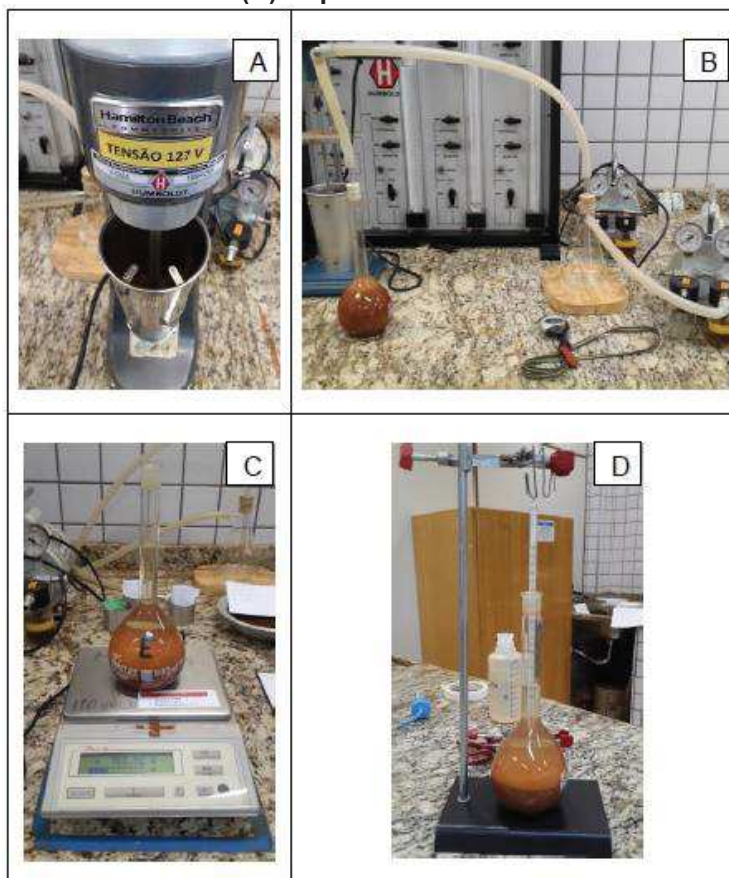
3.3.4 Densidade Real dos Grãos

Para a realização desse procedimento, seguiu-se as considerações da norma ABNT NBR 6458/17 “Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica”.

Este ensaio consistiu em agitar cerca de 40 gf da amostra no dispersor, representado pela Figura 21.A, por aproximadamente 15 minutos. Feito isso, foi transferido a amostra para o balão volumétrico, completando-o com água destilada até a metade de seu volume, tomando o devido cuidado para não ter perdas de material nessas ações. Com a amostra dentro do balão volumétrico, aplicou-se vácuo de 88 kPa, durante 15 minutos. Adicionou-se água destilada até 10 mm abaixo da base do gargalo, e novamente foi aplicado vácuo, afim de se remover as bolhas de ar conforme a Figura 21.B.

Uma vez que as bolhas foram removidas, adicionou-se novamente água destilada, até 10 mm abaixo da marca de calibração do balão volumétrico, o conjunto ficou em repouso até entrarem em equilíbrio térmico com o ambiente. Após isto, adicionou-se água destilada até a marca de calibração do balão volumétrico com o auxílio de uma pipeta, enxugou-se a parte externa do balão e limpou-se seu gargalo com a ajuda de papel toalha. Por fim, o conjunto (balão + solo + água) foi pesado com o auxílio de uma balança, conforme a Figura 21.C, e sua temperatura determinada através de um termômetro de mercúrio, conforme a Figura 21.D.

Figura 21 – (A) Dispensador. (B) Bomba de aplicação de vácuo. (C) Balança e balão volumétrico. (D) Suporte e termômetro.



Fonte – Cataneo (2017).

Após concluído o ensaio, o peso específico dos grãos do solo foi calculado, conforme NBR 6458/17, sendo que a densidade real dos grãos é dada pela relação entre o peso específico dos grãos de solo e o peso específico da água. Esse ensaio foi realizado duas vezes para a mesma amostra, sendo o seu resultado considerado satisfatório quando esses não se divergem mais do que $0,02 \text{ gf/cm}^3$

3.3.5 Teor de Umidade

Todos os valores de teor de umidade, tanto para os ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade quanto para a umidade da amostra de solo, foram obtidos seguindo as considerações da norma ABNT NBR 6457/16 “*Amostra de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização*”.

3.4 ENSAIO DE ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

3.4.1 Moldagem do Corpo de Prova

O Corpo de prova utilizado tanto para o ensaio edométrico (realizado pela acadêmica Marylise Cataneo) e adensamento secundário, ensaio foco desse trabalho, foi moldado em anéis de aço inoxidável com cerca de 20 mm de altura, 50 mm de diâmetro e área de seção transversal de 40,05 cm².

O anel foi encaixado na célula de adensamento, fabricada pela Contenco – Fabricante dos Produtos Pavitest (Figura 22.A). Além disso, a célula foi composta de duas pedras porosas, sendo que uma delas foi colocado na parte superior do anel e a outra na parte inferior.

Após isto, levou-se o conjunto para a prensa de adensamento do tipo *Bishop*, com relação de braço 1:10, também fabricada pela Contenco, ilustrada pela Figura 22.B. Sendo que as leituras das deformações verticais foram feitas através de um extensômetro com sensibilidade de 0,01 mm/div. Os tempos de leituras foram tomados por um cronometro digital.

Figura 22 – (A) Célula de adensamento desmontada, (B) Prensa Bishop de braço 1:10.



Fonte – Autoria própria

3.4.2 Metodologia do ensaio

Inicialmente o corpo de prova foi submetido a um ensaio edométrico com estágios de carregamentos de: 2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; 320 kPa. Sendo que a duração de cada estágio de carga, foi ditado pela velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}_V$) igual a $10^{-8} s^{-1}$. Isso significa que um novo incremento de carga era gerado toda vez que a referida velocidade de deformação fosse alcançada. Essa velocidade ($\dot{\epsilon}_V$) pode ser obtida através da Equação 3.1.

$$\dot{\epsilon}_V = \frac{\Delta H}{\frac{L_{i-1}}{\Delta t}} \quad ; \quad \Delta H = (L_{i-1} - L_i) \quad (3.1)$$

Onde:

- L_{i-1} e L_i = Leituras consecutivas no extensômetro
- ΔH : É a variação da altura do corpo de prova correspondente a duas leituras consecutivas no extensômetro;
- Δt : Intervalo de tempo entre as leituras L_{i-1} e L_i ; e
- $\dot{\epsilon}_V$ = Velocidade de deformação.

Durante o estágio de 320 kPa, Marylise Cataneo, inundou a célula de adensamento, cessando dessa forma, o seu ensaio edométrico. Com o corpo de prova totalmente saturado, foi possível começar o ensaio de adensamento secundário.

Antes do início do referido ensaio, foi necessário calcular quais os pesos necessários no pendural que geraria as tensões desejadas para estudo. Sendo que a Figura 23.B ilustra a prensa de adensamento com uma quantidade de pesos pré calculada em seu pendural. A determinação desse valor pode ser obtida através das Equações 3.2 e 3.3.

$$F_{cp} = \sigma \cdot A \quad (3.2)$$

$$P = \frac{F_{cp}}{A} \quad (3.3)$$

Onde:

- F_{cp} = Força aplicada no corpo de prova, (kN);
- σ = Tensão aplicada, (kPa);

- A = Área do corpo de prova, (m^2), e
- P = Peso aplicado no pendural, (kgf).

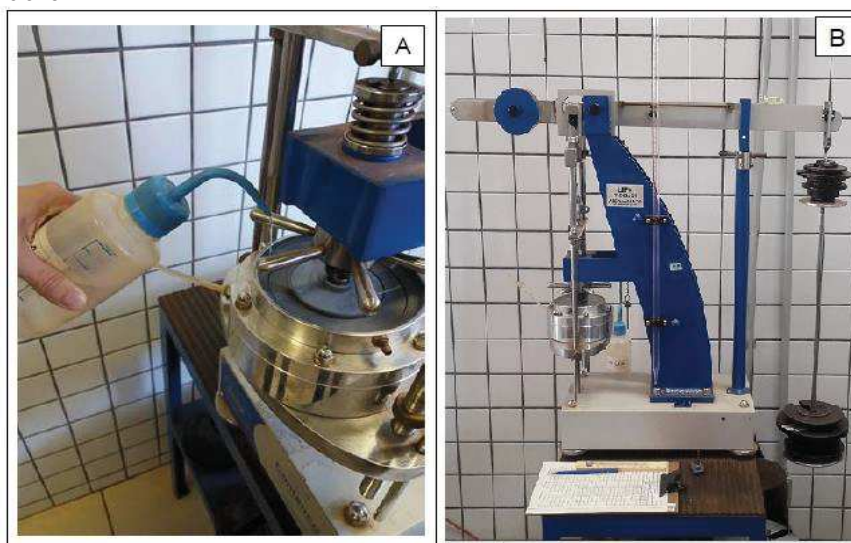
Depois de 8 dias no estágio de 320 kPa inundado, o corpo de prova foi imediatamente descarregado para 306,2 kPa, gerando um $OCR= 1,05$. Após esta etapa, acompanhou-se o corpo de prova por 36 dias, fazendo uma leitura diária e atentando-se para anotar sempre a temperatura ambiente, para isso, foi utilizado um termômetro com coluna de mercúrio. O procedimento de leitura foi o mesmo para os demais descarregamentos.

Ao término dos 36 dias, foi realizado outro descarregamento, reduzindo a tensão efetiva vertical do corpo de prova para 265,76 kPa, resultando em um $OCR=1,2$. Este estágio de carga foi acompanhado por 49 dias.

Por fim, aplicou-se um novo descarregamento, gerando uma tensão efetiva vertical de 42,86 kPa, o que resultou em um $OCR= 7,5$. Este estágio de carga foi acompanhado por 27 dias.

Vale-se ressaltar que para um ensaio de adensamento ocorrer, necessariamente o corpo de prova deve estar saturado. Com isso em mente, toda vez que era feito alguma leitura no extensômetro, preenchia-se a célula de adensamento novamente com água destilada (Figura 23.A), de forma a deixar o corpo de prova saturado.

Figura 23 – (A) Incrementos de água diário na célula de adensamento. (B) Pesos no pendural.



Fonte – Autoria própria.

Seguindo todos os passos citados anteriormente, pode-se obter a Tabela 01.

Tabela 01 – Cronograma do ensaio de adensamento secundário.

Data	Máxima tensão (kPa)	Tensão Inicial (kPa)	Tensão Final (kPa)	OCR	Duração (Dias)
22/ago.	320	320	306,2	1,05	36
26/set.	320	306,2	265,76	1,2	49
14/nov.	320	265,76	42,86	7,5	27

Fonte – Autoria própria.

Sendo que essa tabela apresenta de forma simplificada, um resumo do que foi realizado no ensaio de adensamento secundário, mostrando as datas dos descarregamentos, com suas durações e tensões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

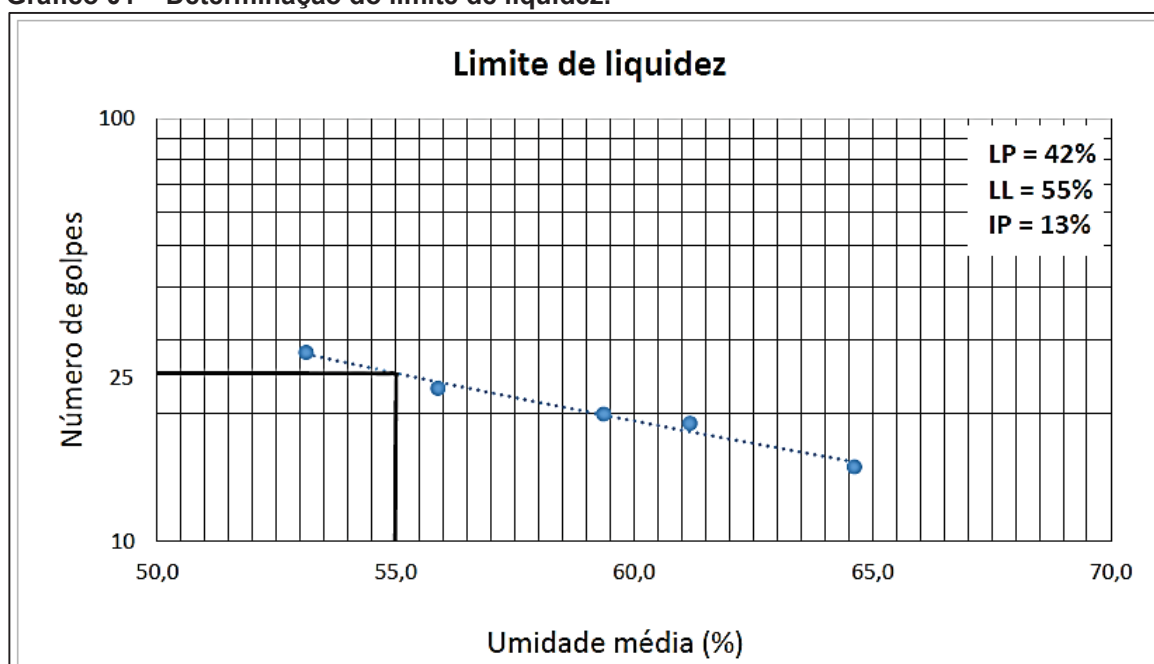
A amostra de solo ensaiada apresentou um limite de liquidez de 55%, um limite de plasticidade de 42%, e conseqüentemente, um índice de plasticidade de 13%. O Gráfico 01 refere-se ao ensaio de limite de liquidez.

O valor da densidade real dos grãos pode ser observado através da Tabela 02, onde mostra a média de valores obtidos entre dois ensaios, dentro das preconizações da NBR 6458/17.

A curva granulométrica é mostrada no Gráfico 02, sendo que suas porcentagens de materiais estão descritas no Quadro 01. Podendo através desses resultados, classificar essa amostra como uma argila silto arenosa.

Por fim, as características iniciais da amostra, tais como: umidade (w), peso específico (γ), peso específico seco (γ_d), volume de sólidos (V_s), volume de vazios (V_v), grau de saturação (S) e índice de vazios inicial (e_0), são apresentados na Tabela 03.

Gráfico 01 – Determinação do limite de liquidez.



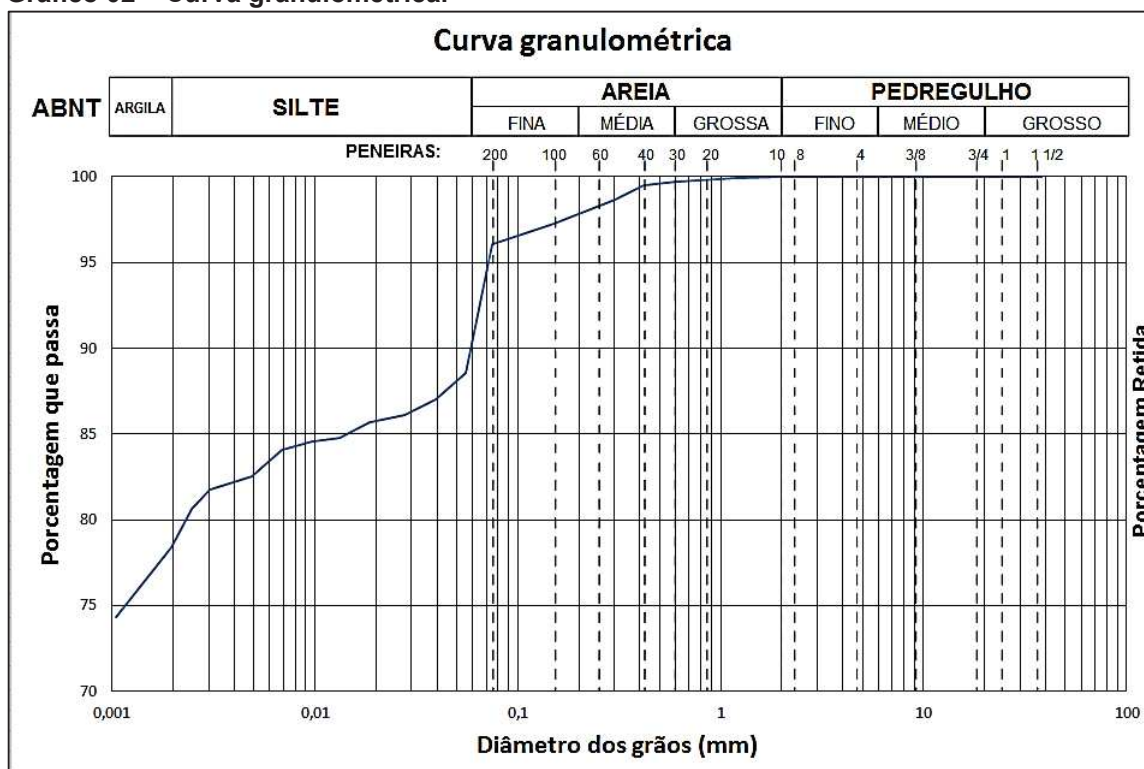
Fonte – Autoria própria.

Tabela 02 – Densidade real dos grãos.

Balão volumétrico	D	E
Peso úmido (gf)	43,88	39,79
Peso balão + solo + água (gf)	701,1	697,5
Peso balão + água (gf)	673,0	672,2
Temperatura (°C)	25,00	25,00
Peso específico da água (gf/cm ³)	0,9971	0,9971
Umidade inicial da amostra (%)	2,800	2,800
Peso específico (gf/cm ³)	2,905	2,880
Densidade real dos grãos	2,913	2,888
Média	2,901	

Fonte – Aatoria própria.

Gráfico 02 – Curva granulométrica.



Fonte – Aatoria própria.

Quadro 01 – Composição granulométrica da amostra de solo.

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
79	12	7	2	0	0

Tabela 03 – Características iniciais da amostra.

w (%)	γ ($\frac{gf}{cm^3}$)	γ_d ($\frac{gf}{cm^3}$)	V_s (cm^3)	V_V (cm^3)	S (%)	e_0
32,15	1,632	1,235	33,88	45,70	69,13	1,349

Fonte – Aatoria própria.

Através de um análise tátil-visual pode-se observar que a amostra era argilosa e avermelhada. Segundo a literatura, é de se esperar que uma amostra argilosa sofra adensamento secundário, no entanto, seu limite de liquidez (55%) é baixo quando comparado com solos que já foram submetidos a estudos semelhantes, como a argila do Sarapuí, estudada por Vieira (1988) e que apresentava um limite de liquidez de 143%. Devido a esse fato, muito provável que o adensamento secundário se manifeste em uma escala menor nesse solo, do que na argila do Sarapuí.

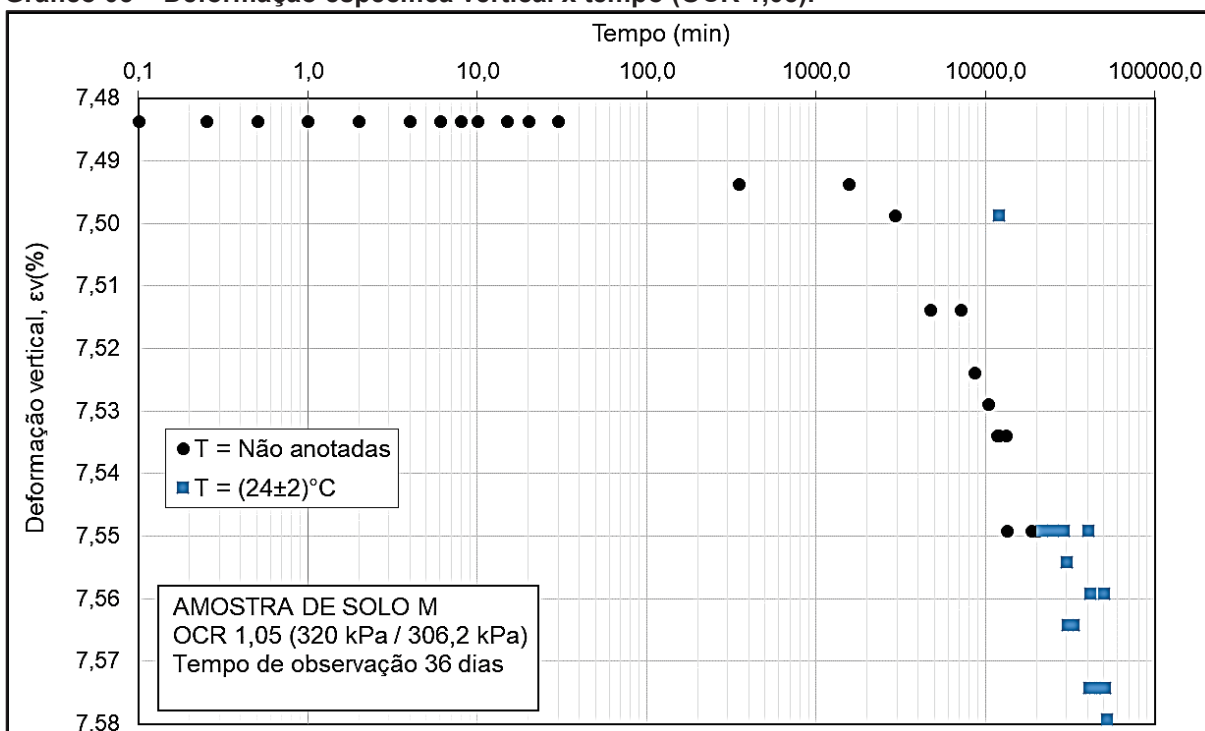
4.2 ENSAIO DE ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

Para analisar os três OCR's gerados, foram plotados os Gráficos 03, 04 e 05 de deformação específica vertical (ε_V) *versus* tempo (escala logarítmica). Sendo que para gerar esses gráficos, foram utilizadas apenas as leituras com temperatura de $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$, excluindo as demais, pois como verificado no tópico 2.2.2, a variação de temperatura influencia na velocidade do adensamento.

Vale-se ressaltar que no início do ensaio do OCR de 1,05, o laboratório não tinha um material que medisse a temperatura do ambiente. Portanto, para o Gráfico 03 não pode-se afirmar que todas as temperaturas estão entre $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$, o que não tem influência na verificação da existência do adensamento secundário, somente em sua velocidade. Posteriormente, no tópico 4.2.1, o efeito de temperatura será abrangido mais afundo, fazendo análises com leituras fora do intervalo de temperatura de $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$.

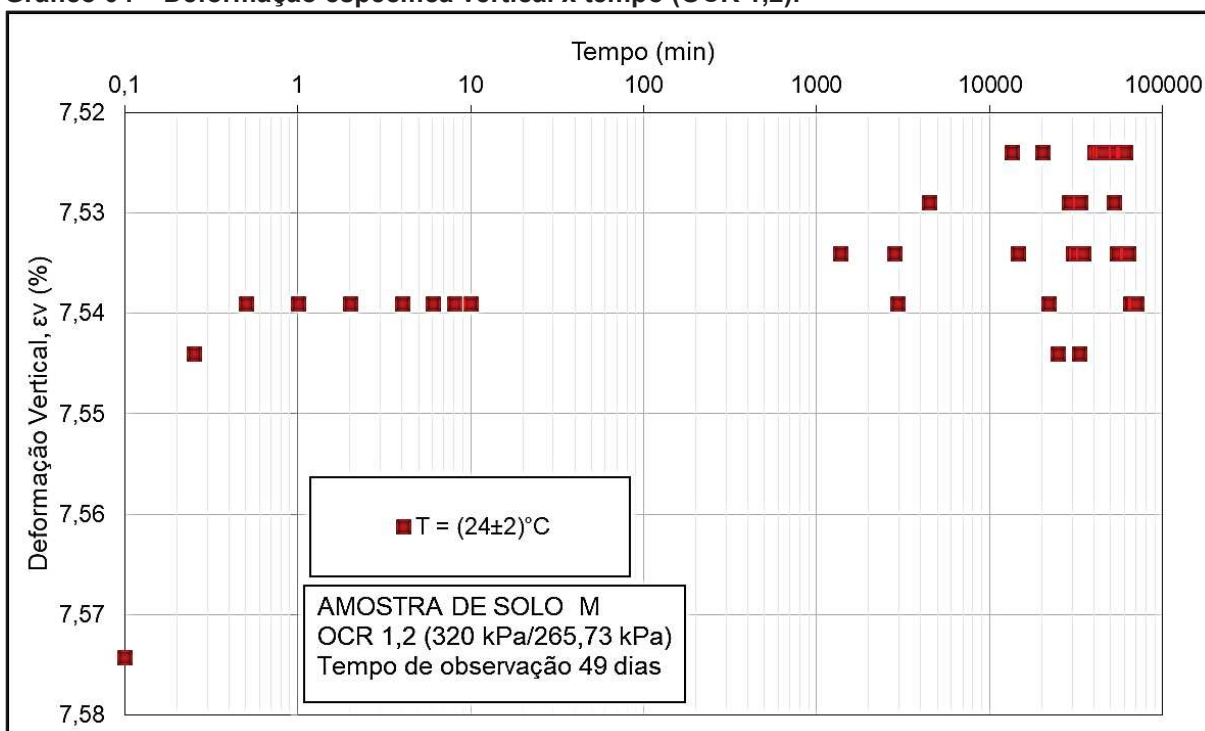
Observando os Gráficos 03, 04 e 05, pode-se perceber que para cada OCR o corpo de prova apresentou comportamentos distintos.

Gráfico 03 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 1,05).

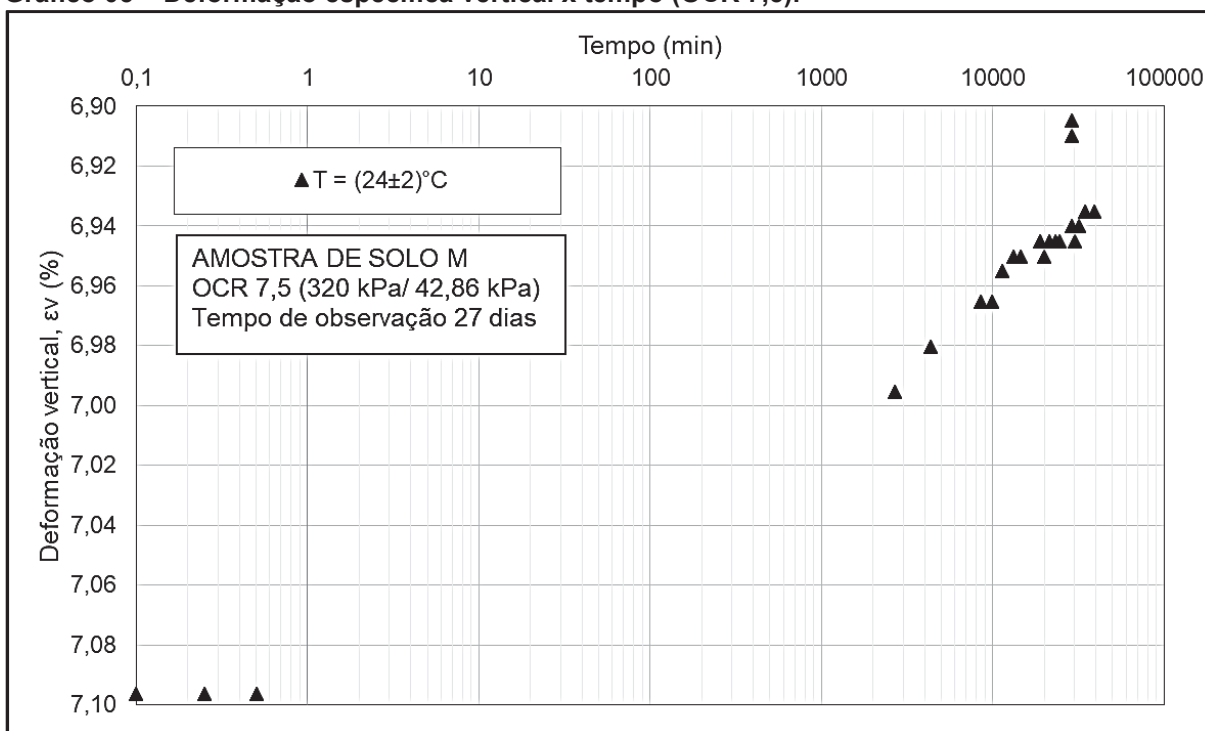


Fonte – Autoria própria.

Gráfico 04 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 1,2).



Fonte – Autoria própria.

Gráfico 05 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 7,5).

Fonte – Autoria própria.

Analisando o Gráfico 03, foi possível perceber que o corpo de prova com OCR 1,05 apresentou uma expansão primária rápida, sendo imperceptível na plotagem do gráfico em escala logarítmica. Logo após, o corpo de prova entrou em um patamar “estável”, sofrendo poucas deformações, essa etapa se estendeu por aproximadamente 5h (300 min). Após isso, pode-se perceber que a amostra começou a apresentar deformações de compressão, aumentando a sua deformação específica vertical ao longo do tempo. Esse comportamento se repetiu por todos os 36 dias.

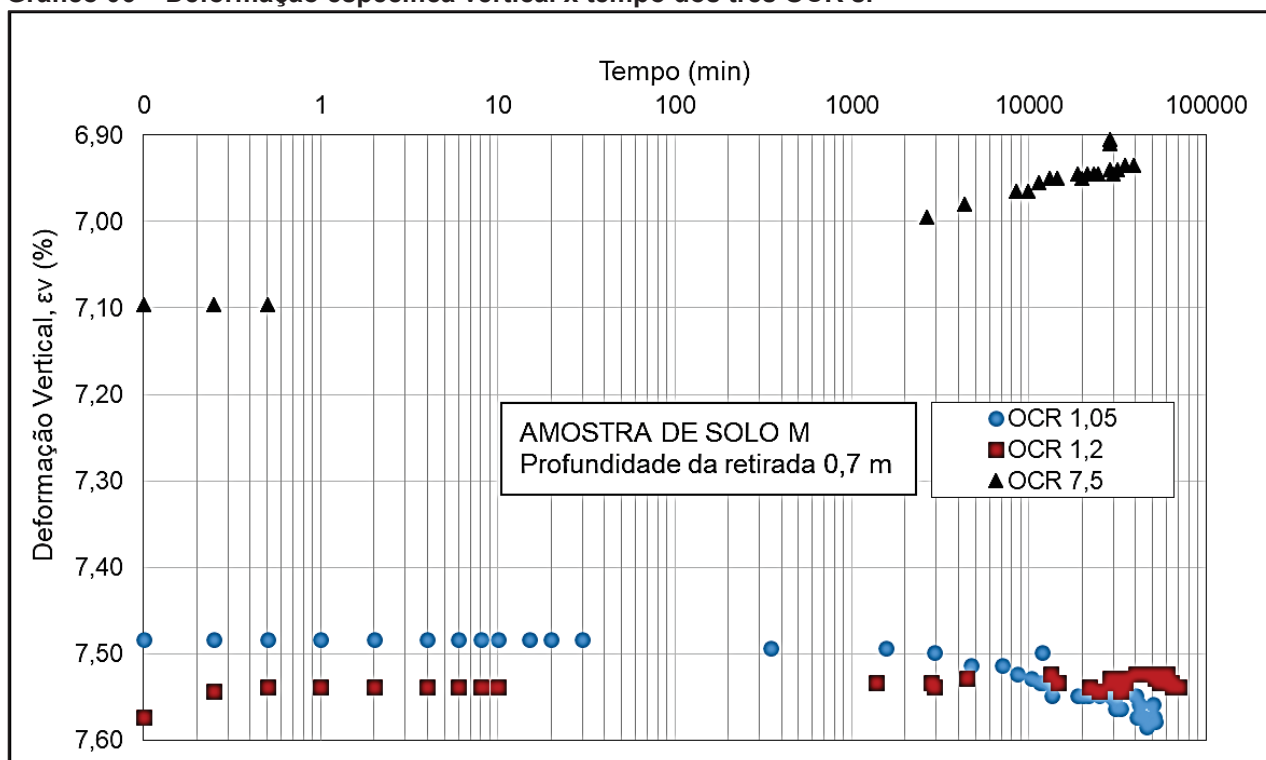
Já para o OCR de 1,2, foi possível perceber através do Gráfico 04, que a expansão primária ocorreu de forma rápida, porém, mais lenta do que a de OCR 1,05, dessa forma, já foi possível perceber a expansão primária no Gráfico 04. Essa etapa está representada pelas deformações correspondentes aos tempos de 0,1 min e 0,25 min do Gráfico 04. Com o término da expansão primária, o OCR de 1,2 também entrou em um patamar “estável” de poucas deformações. De modo que ao fim dessa etapa, o corpo de prova apresentou um comportamento disperso, impossibilitando saber apenas por esse gráfico, se a amostra voltou a comprimir, entrou em estágio de expansão ou manteve-se constante.

Analisando o corpo de prova com OCR 7,5 através do Gráfico 05, percebe-se que novamente a expansão primária se deu de forma rápida e imperceptível no gráfico

de escala logarítmica. Diferentemente dos demais OCR's, ao fim da expansão primária, o corpo de prova continuou apresentando expansões. Esse comportamento se deu ao longo de todos os 27 dias de acompanhamento.

O Gráfico 06 representa o comportamento dos três OCR's juntos, facilitando algumas análises.

Gráfico 06 – Deformação específica vertical x tempo dos três OCR's.



Fonte – Autoria própria.

Com base no Gráfico 06, pode-se tomar algumas conclusões, a primeira delas é que a expansão primária se deu de forma rápida para todos os OCR's, comportamento típico de um solo com alto coeficiente de adensamento. Infelizmente não se pode obter esse coeficiente, devido os estágios iniciais de carregamento terem sido realizados em uma condição de solo não saturado. Entretanto, pode-se especular, com base nos resultados apresentados, que o coeficiente de adensamento para o solo em estudo seja alto.

Além disso, pode-se afirmar, através dos dados do Gráfico 06, que o OCR de 1,05 encontra-se a direita da linha de fim do secundário. Pois mesmo depois do fim da expansão primária, o corpo de prova voltou a comprimir ao longo do tempo, com a tensão efetiva vertical constante. Demonstrando um comportamento típico de um solo em compressão secundária.

Já para o OCR de 7,5, pode-se afirmar que ele se encontra a esquerda da linha de fim do secundário. Pois depois do fim da expansão primária, a amostra continuou expandindo ao longo do tempo, mostrando um comportamento típico de expansão secundária.

Através do Gráfico 06, pode-se perceber que o OCR de 1,2 apresentou uma deformação desprezível quando comparado com os outros dois descarregamentos, indicando que esse OCR se encontra muito próximo da linha de fim do secundário. Entretanto, apenas com esse gráfico não se pode afirmar qual o seu comportamento, esse poderá ser melhor classificado através do Gráfico 07.

Utilizando a Fórmula 3.1 com os dados do Gráfico 06, pode-se obter as velocidades de deformação para cada leitura, inclusive as velocidades de deformação ao final da expansão primária ($\dot{\epsilon}_i$) e ao término de cada estágio de descarregamento ($\dot{\epsilon}_f$), conforme a Tabela 04.

Tabela 04 – Velocidades de deformação no início e no fim do ensaio.

	OCR 1,05	OCR 1,2	OCR 7,5
$\dot{\epsilon}_i$ (s ⁻¹)	2,72x10 ⁻⁰⁵	3,63x10 ⁻⁰⁶	7,98x10 ⁻⁰⁴
$\dot{\epsilon}_f$ (s ⁻¹)	9,73x10 ⁻¹⁰	5,64x10 ⁻¹⁰	5,00x10 ⁻¹⁰

Fonte – Autoria própria.

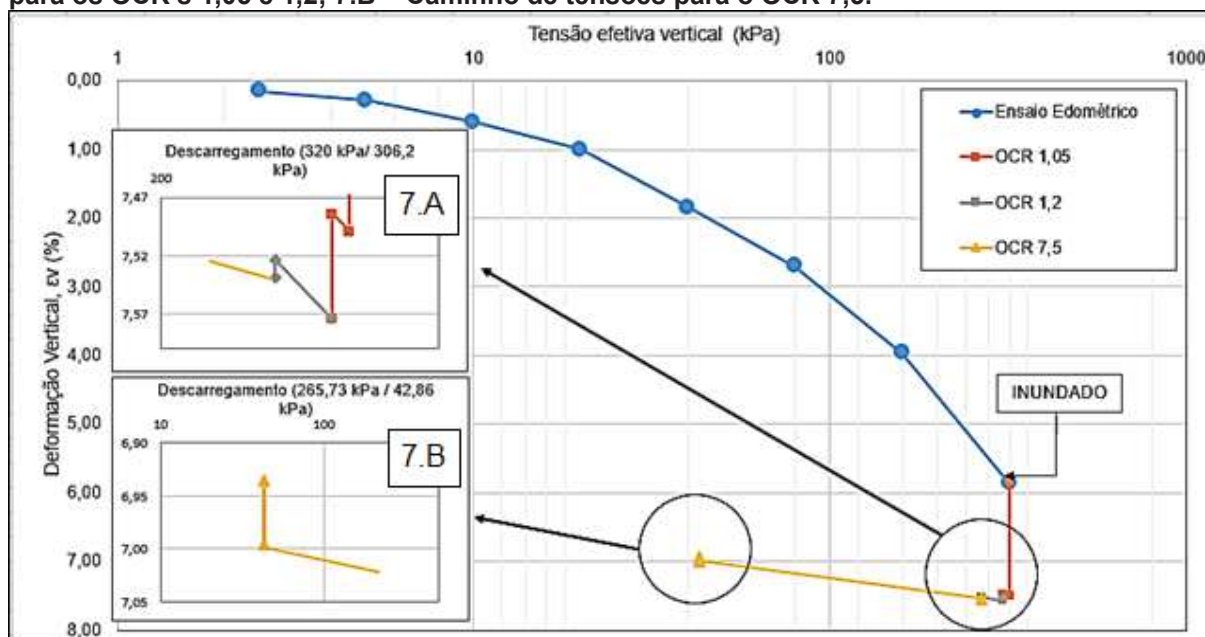
Analisando as $\dot{\epsilon}_i$, percebe-se que a maior delas é de 7,98x10⁻⁰⁴ s⁻¹, gerada pelo OCR de 7,5, já a menor delas, é de 3,63x10⁻⁰⁶ s⁻¹, gerada pelo OCR de 1,2. Sabe-se que quanto mais próximo da linha de fim de secundário menor é a velocidade de deformação. Portanto, é possível afirmar que dentro desses OCR's, o que se encontra mais próximo da linha de fim do secundário é o de 1,2.

Vale-se ressaltar que a $\dot{\epsilon}_i$ ao fim da expansão primária do OCR de 1,5, não pode ser levada em conta para essa análise, pois não tem como afirmar que no momento em que se obteve essa velocidade, a temperatura ambiente se encontrava dentro do intervalo de (24 ± 2) °C.

Analisando as $\dot{\epsilon}_f$, pode-se perceber que todas elas são mais baixas do que as $\dot{\epsilon}_i$. O que indica que os caminhos de tensões para todos os descarregamentos, estavam indo de encontro com a linha de fim do secundário. Entretanto, nenhum dos descarregamentos chegou até a linha de fim do secundário ($\dot{\epsilon} = 0$), linha essa que cessaria as deformações.

Para finalizar as discussões dos resultados sobre adensamento secundário, foi plotado o Gráfico 07 de deformação específica vertical (ε_v) versus tensão efetiva vertical (escala log.).

Gráfico 07 – Caminho de tensões ao longo da curva de compressão; 7.A – Caminho de tensões para os OCR's 1,05 e 1,2; 7.B – Caminho de tensões para o OCR 7,5.



Fonte – Autoria própria.

O Gráfico 07 mostra o caminho seguido pelo corpo de prova na curva de compressão. Pode-se perceber que o solo sofreu incrementos de estágio de cargas até a tensão efetiva vertical de 320 kPa, nessa tensão, o corpo de prova foi inundado, o que fez aumentar a deformação efetiva vertical.

Após essa etapa começou a gerar os três OCR's, podendo observar através do Gráfico 07, 7.A e 7.B, os caminhos de tensões efetivas verticais tomadas para todos os descarregamentos. Além disso, pode-se perceber os efeitos do adensamento secundário nos Gráficos 7.A e 7.B, com a variação da deformação específica vertical ao longo de uma tensão efetiva vertical constante.

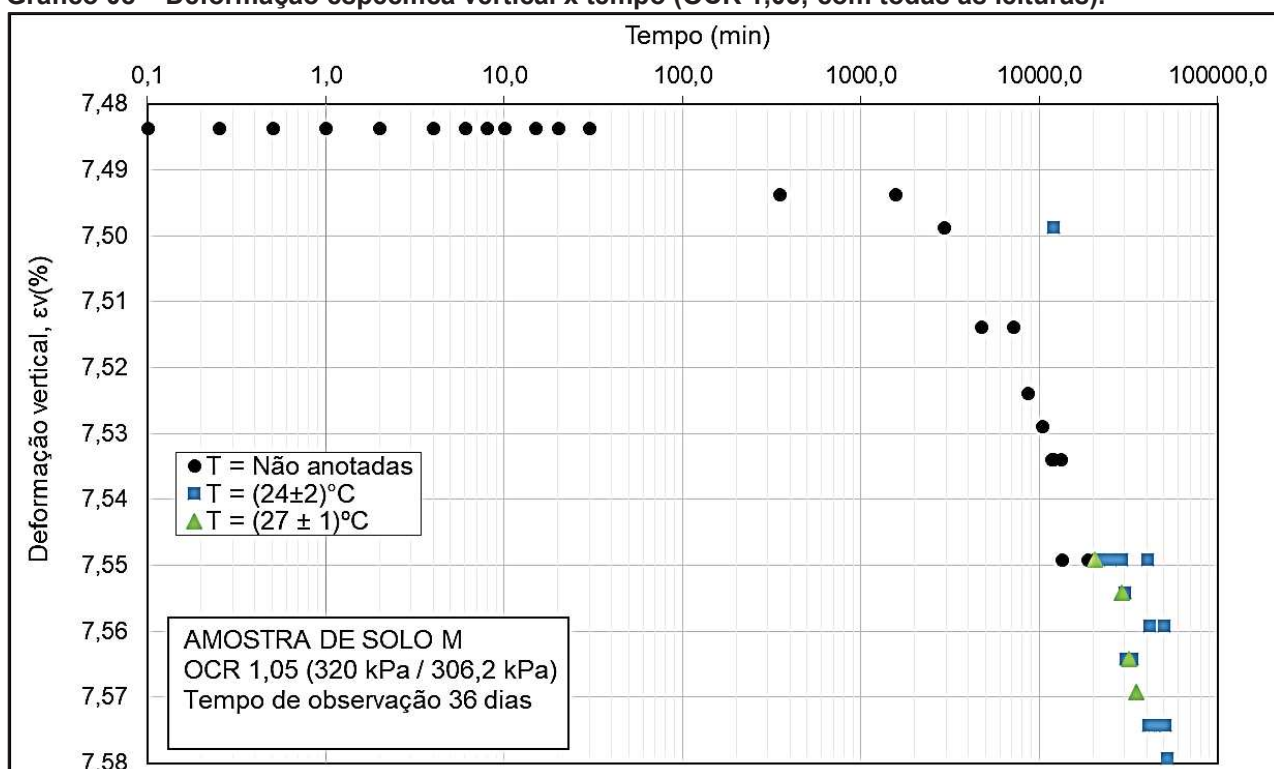
Analisando o Gráfico 7.A fica claro que tanto o OCR de 1,05 quanto o de 1,2 tiveram o mesmo comportamento, de compressão secundária. No entanto, pelo fato do OCR de 1,2 se encontrar mais próximo da linha de fim do secundário, a sua compressão foi menor do que a do OCR 1,05.

4.2.1 Efeito de Temperatura

Devido a impossibilidade de se manter a temperatura ambiente constante no laboratório, foi observado o efeito desta variação durante o adensamento secundário. Portanto, visando um melhor entendimento dos resultados, optou-se por fazer uma explanação geral sobre o efeito que a temperatura teve na amostra.

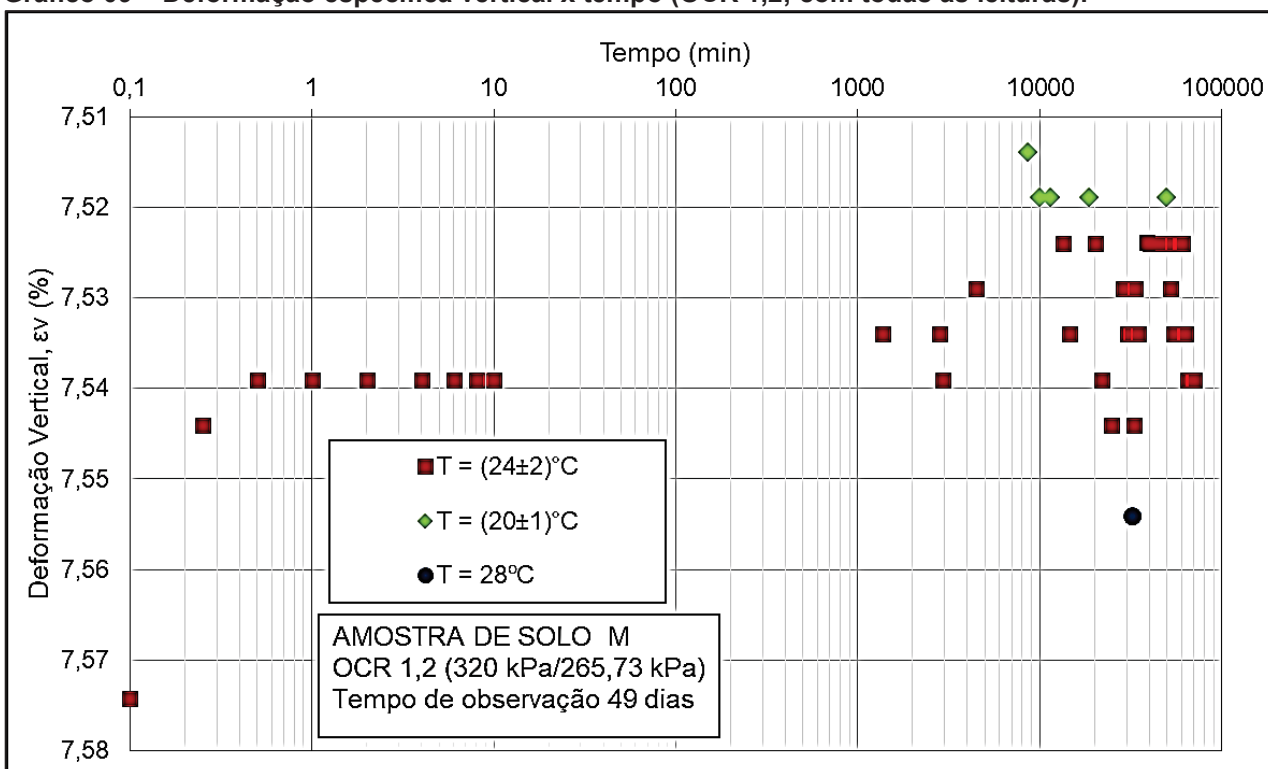
Desse modo, todas as leituras, independentemente da temperatura, foram contabilizadas, diferentemente do tópico 4.2. Para realizar esse estudo, foram plotados os Gráficos 08,09 e 10 de deformação específica vertical (ε_V) *versus* tempo (escala logarítmica)

Gráfico 08 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 1,05; com todas as leituras).



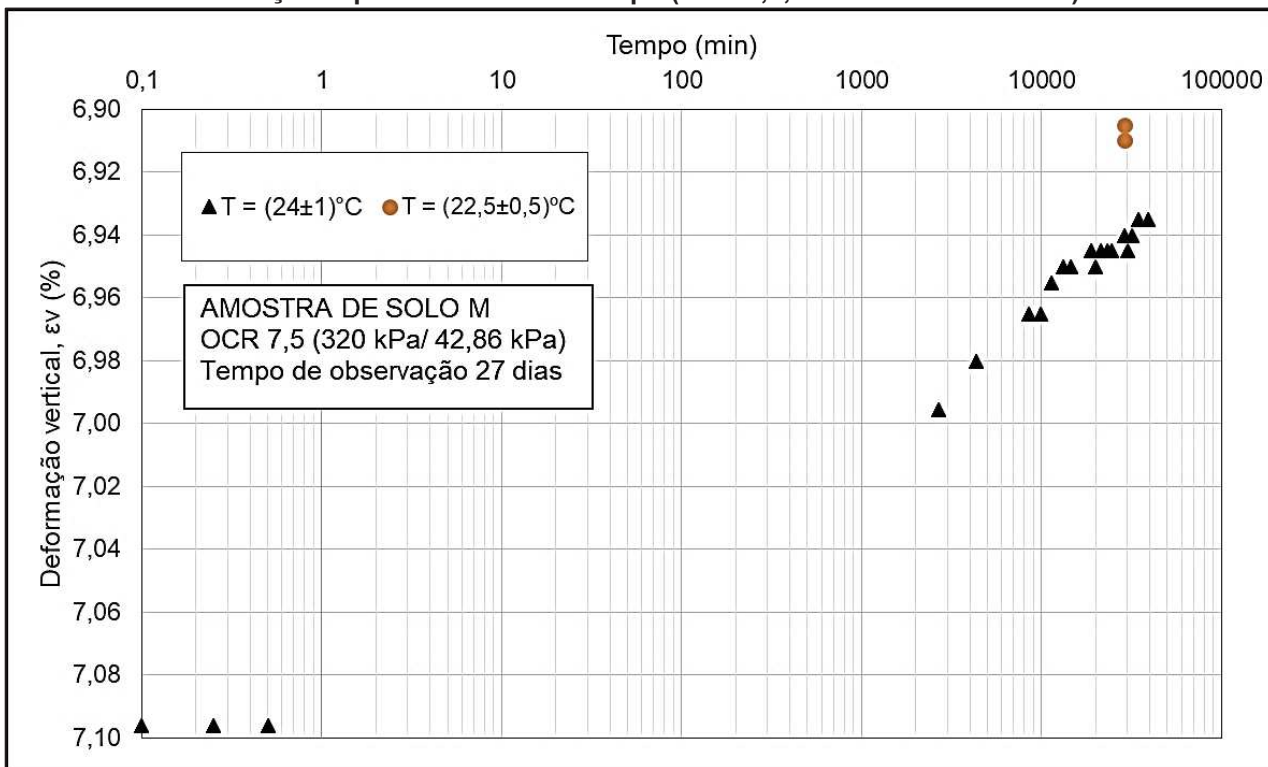
Fonte – Autoria própria.

Gráfico 09 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 1,2; com todas as leituras).



Fonte – Autoria própria.

Gráfico 10 – Deformação específica vertical x tempo (OCR 7,5; com todas as leituras).



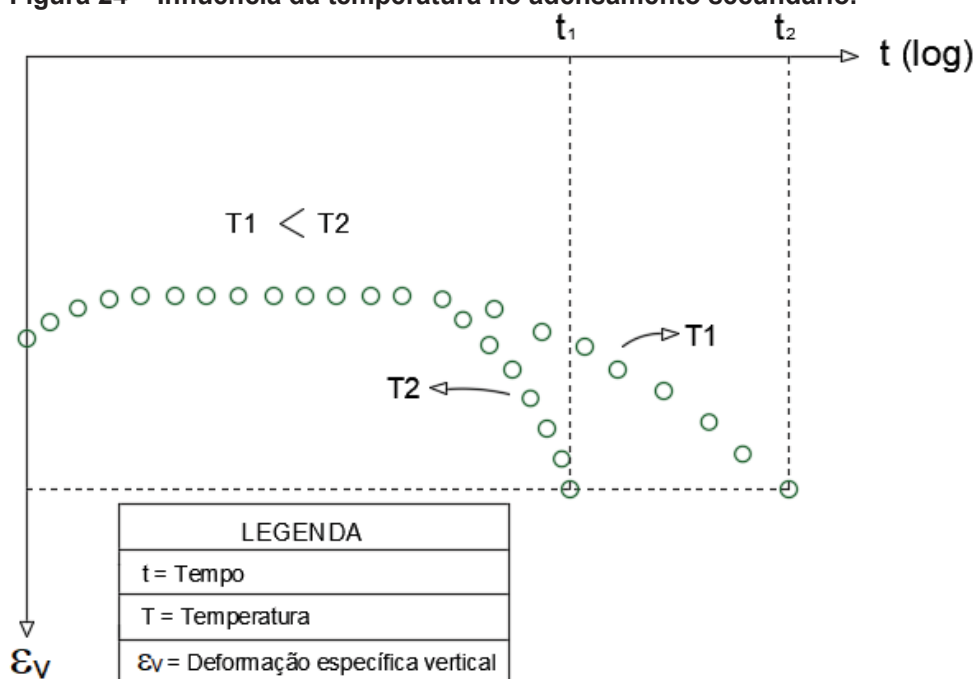
Fonte – Autoria própria.

Observando os Gráficos 09 e 10, pode-se perceber que a deformação no adensamento secundário e a temperatura são proporcionais. Diante disso, a leitura relacionada a temperatura de 28°C, no Gráfico 09, apresenta uma maior deformação específica vertical em um mesmo espaço de tempo, quando comparado com as demais. Já as leituras relacionadas a temperatura de $(22,5 \pm 0,5)$ °C, no Gráfico 10, tem uma menor deformação específica vertical em um mesmo espaço de tempo.

A proporcionalidade entre o adensamento secundário e a temperatura pode ser explicada pelo fato de que a viscosidade se dá em função da temperatura. Assim, quanto maior a temperatura, menor a viscosidade da água adsorvida, portanto, mais rápido acontece o adensamento secundário.

Dessa forma, pode-se presumir que existe um caminho de deformação específica, no adensamento secundário, para cada temperatura. Esse caminho será mais íngreme em amostras ensaiadas sob temperaturas maiores. O aumento da temperatura proporciona um aumento da velocidade de deformação do solo. Entretanto, mesmo com uma maior ou menor velocidade de deformação, o corpo de prova apresentará no final do adensamento secundário, sempre a mesma deformação específica vertical, independentemente da temperatura ambiente durante o ensaio. A Figura 24 ilustra os possíveis caminhos de deformação de uma amostra submetida a diferentes temperaturas.

Figura 24 – Influência da temperatura no adensamento secundário.



Fonte – Autoria própria.

A deformação final não é afetada pela temperatura, devido ao fato de que na linha de fim do secundário, as tensões efetivas se dão somente através dos contatos do tipo mineral-mineral. Esse tipo de contato não é afetado pela variação de temperatura.

Com isso em mente, pode-se fazer algumas especulações sobre o Gráfico 08. Analisando os três intervalos de temperaturas abordados, percebe-se que o caminho de deformação específica das temperaturas não anotadas, esta transladada para baixo das temperaturas de (24 ± 2) °C, se aproximando mais dos pontos com temperatura de (27 ± 1) °C. Dessa forma, pode-se especular que as temperaturas não anotadas estariam em um intervalo de temperaturas maiores do que a de (24 ± 2) °C, se aproximando mais, ou até mesmo se encontrando dentro, do intervalo de (27 ± 1) °C.

5 CONCLUSÕES

5.1 ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

Por meio do ensaio de adensamento edométrico, constatou-se que o adensamento secundário é um fenômeno a ser considerado na análise de recalques. O mecanismo proposto pelo Grupo de Reologia da COPPE, foi verificado no solo em estudo, a partir das razões de sobreadensamento (OCR's) geradas, 1,05, 1,2 e 7,5.

Os OCR's de 1,05 e 1,2, apresentaram compressão secundária, no entanto, a variação de deformação foi pequena (0,02%) para a amostra submetida ao OCR de 1,2. Com base nesse resultado, é possível afirmar que a linha de fim do secundário esteja próxima do referido OCR.

Para o OCR de 7,5, o corpo de prova apresentou um comportamento diferenciado dos demais, uma expansão secundária.

5.2 EFEITO DA TEMPERATURA

Analisando os efeitos da temperatura, foi possível constatar que todas as características previstas pelo mecanismo do Grupo de Reologia da COPPE, ao que se refere a água adsorvida, foram observados.

Os resultados mostraram que a água adsorvida é altamente influenciada pela temperatura, pelo fato dessa ser muito viscosa. De modo que, quanto maior a temperatura, menos viscosa irá se encontrar essa água, conseqüentemente mais fácil irá ocorrer a sua dissipação, aumentando a sua velocidade de deformação.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Observar, a partir de uma amostra, o comportamento de vários corpos de prova submetido a diferentes razões de sobreadensamento, afim de identificar a faixa de equilíbrio para qual as velocidades de deformação são nulas.

Estudar o efeito da temperatura no adensamento secundário a partir da realização de ensaios de longo prazo, submetidos a diferentes estágios de temperaturas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459** Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 1986.

AGUIAR, Vitor N. **Características de adensamento da argila do canal de porto de Santos na região da ilha Barnabé**. 2008. 223 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

ANDRADE, Mauricio, E.S. **Contribuição ao estudo das argilas moles da cidade de Santos**. 2009. 397 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

ANDRADE, Mauricio, E.S. **Adensamento unidimensional considerando a resistência viscosa à compressão**. 2014. 188f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

BRASIL, Marcio R. **Cálculo de recalques por adensamento unidimensional**. 2015. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

CATANEO, Marylise. **Verificação do fenômeno do colapso em um solo típico de Toledo – PR**. 2017. 35f. Trabalho de conclusão de curso (em andamento) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, Brasil, 2017.

DOMINGOS, Gustavo, S. **O efeito tridimensional e de fluência nos recalques de fundações em argila: o método de Skempton e Bjerrum revisitado**. 2008, 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

EMBRAPA. **Mapa de solos do estado do Paraná**. 1 ed. Rio de Janeiro, Brasil. 73f. 2007.

FEIJÓ, Rogério, L. **Relação entre a compressão secundária, razão de sobreadensamento e coeficiente de empuxo no repouso**. 1991, 167f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1991.

FUTAI, Marcos, M. **Considerações sobre a influência do adensamento secundário e o uso de reforços em aterros sobre solos moles**. 2010, 178f. Tese (Livre docência) – Departamento de estruturas e o geotécnica da escola politécnica da USP/ Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2010.

GARCIA, Sérgio, G.F. **Relação entre o adensamento secundário e a relaxação de tensões de uma argila mole submetida à compressão endométrica**. 1996, 157f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1996.

GRAY, H. **“Progress Report on Research on Consolidation of Fine-Grained Soils”**, Proceedings, First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Massachusetts, 1936. vol 1, p. 138-141.

LACERDA, W., MARTINS, I. S. M. “Discussion of Time Dependence of Lateral Earth Pressure”, **Journal of Geotechnical Engineering – ASCE**. Vol. 111, Nº 10, f. 1242 – 1244. (1985).

MARTINS, Ian, S.M. **Fundamentos de um modelo de comportamento de solos argilosos saturados**. 1992, 257f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1992.

MOTA, Jorge, L.C.P da. **Estudo do adensamento unidimensional com carregamento crescente com o tempo**. 1996, 124f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1996.

NOGUEIRA, Estela, G. **Estudo de algumas soluções de tratamento de solos moles para construção de aterros no trecho sul do Rodoanel – SP**. 2010, 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2010.

PAASWELL, R.E., **“Temperature Effects on Clay Soil Consolidation”**, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1967. vol.93(3), paper 5225,. May,. p. 9-22

PINTO, Carlos, S. **Curso básico de mecânica dos solos com exercícios resolvidos**. 3. Ed. São Paulo. 367f. 2006.

TAYLOR, Donald, W. **Fundamentals of Soil Mechanics**. John Wiley e Sons. New York. 700f. 1948.

TERZAGHI, K., FRÖLICH, O.K. **“Theorie der setzung von tonschichten”**. Franz Deuticke. Vienna. 1936.

VIEIRA, L.O.M. **Contribuição ao estudo do adensamento secundário**. 1988, 137 f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1988.