

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

RAFAELA TAINÁ SCARIOT

AVALIAÇÃO DE RECALQUES EM SOLOS FINOS COM O USO DOS ENSAIOS CPTU
E DE ADENSAMENTO: MÉTODO DE RECALQUES DE JANBU

Joinville

2022

RAFAELA TAINÁ SCARIOT

AVALIAÇÃO DE RECALQUES EM SOLOS FINOS COM O USO DOS ENSAIOS CPTU
E DE ADENSAMENTO: MÉTODO DE RECALQUES DE JANBU

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Helena Paula Nierwinski.

Coorientador: Dr. Marcelo Heidemann.

Joinville

2022

RAFAELA TAINÁ SCARIOT

AVALIAÇÃO DE RECALQUES EM SOLOS FINOS COM O USO DOS ENSAIOS CPTU
E DE ADENSAMENTO: MÉTODO DE RECALQUES DE JANBU

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 28 de julho de 2022.

Banca Examinadora:

Dr. Marcelo Heidemann
Coorientador/Presidente

Dr. Julian Asdrubal Buritica Garcia
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Edgar Odebrecht
Membro
Universidade do Estado de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Aos meu pais, Leomar e Nilce, que nunca mediram esforços para me proporcionar uma educação de qualidade e me apoiaram em todas oportunidades e decisões com muito carinho e amor.

À minha irmã, Vanessa, que sempre me apoiou e ajudou quando precisei.

Aos meus tios, Neusa e Antoninho, e primas, Grazielle e Larissa, que sempre me acolheram e me proporcionaram uma segunda família.

A minha melhor amiga de vida, Fabiele, por sempre se fazer presente mesmo à distância e ser a minha pessoa.

A todos os professores e profissionais que fizeram parte do meu ensino com muita dedicação e incentivo nesta universidade de excelente qualidade, especialmente a minha orientadora, professora Dra. Helena, e coorientador, professor Dr. Marcelo, que me transmitiram todo o conhecimento e admiração pela geotecnia.

À empresa Geoforma Engenharia por me dar a oportunidade de estagiar e atuar no ramo de investigação geotécnica e me proporcionar todo o material para o desenvolvimento deste trabalho, especialmente ao Edgar Odebrecht pelo incentivo a pesquisa realizada e aos demais colegas pelo apoio e suporte durante esta trajetória.

Aos meus amigos de faculdade, que sempre me acompanharam nesta trajetória e dividiram momentos inesquecíveis comigo, especialmente Bárbara, Suzane, Thayse, Mariana, Ana Luiza, Thalita, Géssica, Natália e Luiz Guilherme.

Aos meus amigos de intercâmbio, que compartilharam o ano mais intenso da minha vida em meio a uma pandemia e sempre estiveram lá para me apoiar e me abrigar, especialmente a minha dupla Valentina.

Aos colegas do curso, que dividiram as dores e bonificações das disciplinas cursadas com muita parceria e dedicação.

À atlética e membros que compartilharam comigo todo meu amor ao esporte, desde a organização de campeonatos e comemorações de títulos, me proporcionando uma vida social e divertida dentre todas as responsabilidades vividas na universidade.

Ao Cascata FC e ao Triplo X, por me tornarem parte da família mesmo com toda a rivalidade e por todas as copas vividas.

“Unfortunately, soils are made by nature and not by man, and the products of nature are always complex...” (TERZAGHI, 1936).

RESUMO

Este trabalho consiste em analisar a aplicação do método de Janbu para estimativa de recalques em ensaios de CPTU e de adensamento em solos finos. O método convencional para determinar deformações é realizado a partir do ensaio de adensamento com o uso dos parâmetros: coeficiente de compressibilidade, de recompressão e índice de vazios inicial do solo. O método de Janbu propõe uma simplificação com o uso de apenas o número de módulo da reta virgem (m) e de recompressão (m_r), oriundos de correlações com os parâmetros de adensamento ou por equacionamento proposto, que permite a análise por resultados de ensaios de CPTU. Portanto, a aplicabilidade do método garante estimar recalques com o uso de apenas um ensaio de campo, eliminando a necessidade do tempo e investimento necessário para ensaios de adensamento em laboratório. A proposta apresentada foi estudar 25 camadas de solos finos determinadas em 20 ensaios de piezocone, onde coletaram-se amostras para a caracterização geotécnica do solo e para realização de ensaios de adensamento, de maneira que os resultados destes ensaios foram utilizados para estimar suas deformações verticais com diferentes métodos e compará-los. Os recalques foram efetuados com quatro carregamentos e por quatro metodologias: pelo método convencional da teoria de adensamento (ρ_4), pelo método de Janbu com m derivado dos parâmetros do ensaio de adensamento (ρ_1), pelo método de Janbu com m calculado por equacionamento proposto do método para ensaios de CPTU (ρ_2) e pelo método de Janbu em ensaios de piezocone com m adotado com valores típicos da literatura de Fellenius (2006) (ρ_3). Os resultados entre os métodos foram condizentes, sendo que ρ_1 , ρ_3 e ρ_4 apresentaram magnitudes de recalques com valores conservadores e com menores variações. As deformações ρ_2 revelaram-se com menores magnitudes, devido esta aplicação do método no ensaio de piezocone considerar a não homogeneidade dos solos e picos de resistências, oriundos da presença de lentes de areia e conchas marinhas entremeadas nas camadas dos solos finos.

Palavras-chave: Recalques. Ensaio de Adensamento. Ensaio de Piezocone. Método de Janbu.

ABSTRACT

This work consists of analyzing the application of Janbu's method for estimating settlement in CPTU and oedometer (consolidation) tests on cohesive soils. The conventional method for determining deformations is based on the oedometer test using the following parameters: the compression index, the re-compression index and the void ratio. The Janbu's method proposes a simplification for the conventional process by using only the modulus number (m) and recompression modulus number (m_r), derived from correlations with the compressibility parameters or by proposed equation, which allows the analysis by the results of the CPTU tests. Therefore, the applicability of the method guarantees to estimate settlements using only one field test, eliminating the need for the time and investment required for oedometer tests. This thesis aimed to study 25 layers of fine soils obtained in 20 piezocone tests, where samples were collected for geotechnical characterization of the soil and performance of oedometer tests. Through the results of these tests it was possible to estimate their vertical deformations in addition to performing a comparison between the different methods applied. The settlements were measured with four loads and by four methodologies: by the oedometer test method (ρ_4), by Janbu's method with modulus number derived from the correlation with compressibility parameters (ρ_1), by Janbu's method with modulus number calculated by equation proposed for CPTU tests (ρ_2), and by Janbu's method with modulus number adopted with typical values provided in the literature to piezocone tests (ρ_3). The results between the methods were consistent, with ρ_1 , ρ_3 and ρ_4 giving settlement magnitudes with conservative values and less variation. The settlement ρ_2 presented smaller magnitudes, because during the application of its method in the piezocone test it was considered the inhomogeneity of the soils and resistance peaks, which are caused by the presence of sand lenses and sea shells interspersed in the layers of fine soils.

Keywords: Settlements. Oedometer Test. Piezocone Test. Janbu Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Recalque nos trechos de recompressão e de reta virgem	22
Figura 2 – Recalque no trecho de recompressão	23
Figura 3 – Recalque no trecho de reta virgem.....	24
Figura 4 – Representação esquemática da célula de adensamento.....	25
Figura 5 – Exemplo de curva de adensamento	26
Figura 6 – Exemplo de tensão de pré-adensamento pelo método de Pacheco Silva.....	27
Figura 7 – Exemplo de tensão de pré-adensamento pelo método de Pacheco Silva.....	27
Figura 8 – Posição dos elementos filtrantes para obtenção de u_1 , u_2 e u_3	30
Figura 9 - Correções impostas às medidas de ensaios de piezocone.....	31
Figura 10 – Exemplo de resultado de ensaio de CPTU.....	31
Figura 11 – Exemplo de classificação dos solos pelo I_cR_W para perfil obtido de CPTU.....	33
Figura 12 – Ábaco para classificação do solo segundo Jefferies e Davies (1993).....	34
Figura 13 – Camadas compressível consideradas no CPTU 03 da obra C.....	41
Figura 14 – Exemplos de resistências de ponta corrigidas e filtradas	43
Figura 15 – Camadas consideradas na vertical de CPTU-12 da obra E	44
Figura 16 – Esquema para determinar os valores de m	45
Figura 17 – Metodologia para cálculo de ρ_1	46
Figura 18 – Esquema metodológico para obtenção de ρ_2	47
Figura 19 – Comparativo de m_1 , m_2 e m_3 por amostras	51
Figura 20 – Parâmetro m_1 e m_2 para o CPTU-10 da obra F e CPTU-03 da obra C	52
Figura 21 – Recalques ρ_1 e ρ_4 para a camada de 4,1 m a 6,0 m da AM-11 da obra E.....	54
Figura 22 – Recalques por carregamentos da AM-04.1 da obra C.....	57
Figura 23 – Recalques por carregamentos da AM-10.1 da obra E.....	57
Figura 24 – Recalques para os carregamentos de 25 kPa.....	58
Figura 25 – Recalques para os carregamentos de 150 kPa.....	58
Figura 26 – Recalques para o carregamento de 25 kPa.....	60
Figura 27 – Recalques para o carregamento de 150 kPa.....	60
Figura 28 – ρ_1 , ρ_2 e ρ_3 versus ρ_4	61
Figura 29 – ρ_1 e ρ_3 versus ρ_4	61
Figura 30 – Recalques para todos os carregamentos da AM-07 da obra A.....	62
Figura 31 – Recalques para todos os carregamentos da AM-01 da obra C.....	63

Figura 32 – Números de módulo (m) e recalques para a obra D.....	63
Figura 33 – Números de módulo e recalques para as turfas no carregamento de 150 kPa	64
Figura 34 – Recalques para a amostra 11 da obra E.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais ensaios de campo e de laboratório	20
Quadro 2 – Classificação do solo segundo o índice I_cR_w	33
Quadro 3 - Valores de K_I das argilas brasileiras.....	34
Quadro 4 – Disposição dos ensaios por obra.....	39
Quadro 5 – Caracterização das amostras coletadas	39
Quadro 6 – Comparativo de m_1 e m_2 por amostras	50
Quadro 7 – Tensões e histórico de tensões por amostra de adensamento	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios para classificação da qualidade de amostra	29
Tabela 2 – Valores típicos de número de módulo (m).....	35
Tabela 3 - Coeficiente modificador (a) para diferentes tipos de solos.....	37
Tabela 4 – Critérios para adoção do coeficiente modificador (a)	42
Tabela 5 – Critérios para adoção de m_3 da literatura	45
Tabela 6 – Parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento.....	48
Tabela 7 – Valor médio de m_1 e m_2 por tipo de solo.....	52
Tabela 8 – Recalques por adensamento ρ_4 para os diferentes carregamentos	55
Tabela 9 – Recalques pelo método Janbu ρ_2 e ρ_3 para os diferentes carregamentos	56
Tabela 10 – Variação percentual dos recalques por adensamento (ρ_2) para os recalques por CPTU (ρ_3) para os carregamentos de 25 kPa e 150 kPa	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CPT – Ensaio de Cone

CPTU – Ensaio de Piezocone

NSPT – Resistência de ponta à percussão

OCR - Razão de pré-adensamento (“Overconsolidation ratio”)

SPT – Sondagem à Percussão

LISTA DE SÍMBOLOS

a – Coeficiente modificador

a - Razão entre as áreas desiguais obtido com a calibração do piezocone

A_n/A_t - Área interna da seção transversal / Área externa da seção transversal

B_q – Parâmetro de poropressão

c' – Coesão efetiva do solo

C_c – Coeficiente de compressibilidade

C_r – Coeficiente de recompressão

C_v – Coeficiente de adensamento

Ch – Coeficiente horizontal

E – Módulo de elasticidade

e_0 – Índice de vazios inicial

f_t – Atrito lateral

F_r - Razão de atrito normalizada

φ' – Ângulo de atrito interno do solo

G – Densidade real dos grãos

G_0 - módulo cisalhante a pequenas deformações

H – Espessura da camada compressível

Ic_{RW} - Classificação do solo segundo Robertson e Wride (1998)

Ic_{JD} - Classificação do solo segundo Jefferies e Davies (1993)

j - Expoente de tensão

K_0 – Coeficiente de empuxo no repouso

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

m – Número de módulo do trecho virgem

m_1 – Número de módulo derivado dos parâmetros do ensaio de adensamento

m_2 – Número de módulo calculado com equacionamento proposto ao método de Janbu em CPTU

m_3 – Número de módulo adotado segundo valores típicos da literatura de Fellenius (2006)

m_r – Número de módulo de recompressão

ρ_1 – Recalque pelo método de Janbu com parâmetros correlacionados ao ensaio de adensamento

ρ_2 – Recalque pelo método de Janbu em CPTU com m calculado com equacionamento proposto ao método

ρ_3 – Recalque pelo método de Janbu em CPTU com m adotado segundo valores típicos da literatura

ρ_4 – Recalque pelo método convencional de adensamento unidimensional primário

q_c – Resistência de ponta

q_t – Resistência de ponta corrigida

Q_{tn} – Resistência normalizada da ponta do cone

R_f – Razão de atrito

S_u – Resistência não-drenada

S_t – Sensibilidade das argilas

σ'_{vm} – Tensão de pré-adensamento

σ'_{v0} – Tensão efetiva vertical inicial em determinada profundidade

σ'_{v1} – Tensão efetiva vertical final em determinada profundidade

v – Coeficiente de Poisson

u_0 – Poropressão estática inicial em determinada profundidade

u_1 – Poropressão medida na ponta do cone em determinada profundidade

u_2 – Poropressão medida na base do cone em determinada profundidade

u_3 – Poropressão medida na luva do cone em determinada profundidade

W_n – Umidade natural do solo

Δe – Variação de índice de vazios

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS.....	18
1.1.1. Objetivo Geral	18
1.1.2. Objetivos Específicos.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1. INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA.....	19
2.2. AVALIAÇÃO DE RECALQUES.....	21
2.3. ENSAIO DE ADENSAMENTO.....	25
2.4. ENSAIO DE PIEZOCONE (CPTU).....	29
2.5. MÉTODO DE JANBU PARA ESTIMATIVA DE RECALQUES.....	35
3. APRESENTAÇÃO DOS DADOS.....	39
4. METODOLOGIA.....	42
5. ANÁLISES E RESULTADOS	48
5.1. NÚMERO DE MÓDULO (<i>M</i>).....	48
5.2. ANÁLISE DE RECALQUES	53
6. CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS	69
ANEXO A – ENSAIOS DE PIEZOCONE.....	71
ANEXO B – CURVAS DE ADENSAMENTO	81

1. INTRODUÇÃO

A investigação geotécnica de um solo para a elaboração de uma obra civil é de suma importância, pois os solos podem apresentar diferentes formações geológicas, comportamentos e, por consequência, diferentes parâmetros de projeto (PINTO, 2006). Os solos moles têm baixa capacidade de resistência mecânica, com comportamentos distintos quando carregados, trazendo desafios à área geotécnica (SOSNOSKI, 2016).

O recalque é o assentamento sofrido por um solo ao ser carregado, ocasionado pela deformação ou rearranjo das partículas do solo e pela redução do índice de vazios, seja pela expulsão da água ou do ar, dos espaços vazios. Existem três categorias para diferenciar os processos de recalque: o recalque elástico (ou imediato), o recalque por adensamento primário e o recalque por compressão secundária (DAS, 2007).

No caso dos materiais finos, com baixa permeabilidade e em situação de saturação, os carregamentos externos se convertem, imediatamente, em excessos de poropressões, onde, à medida que a água é drenada do solo, com o passar do tempo, ocorre a dissipação dessas poropressões gerando um assentamento no solo por adensamento, transferindo esse acréscimo de tensão às partículas do solo, aumentando, então, o estado das tensões efetivas (HEIDEMANN, 2021).

Ao comparar as deformações sofridas por materiais granulares com finos, pode-se identificar maior compressibilidade nos materiais finos ao longo do tempo. Ao realizar um carregamento em solos granulares, a carga será suportada pela interação entre as partículas de solo e a água presente saíra no mesmo momento, visto ser material com alta permeabilidade, geralmente apresentando maior recalque imediato (DAS, 2007).

Segundo Caputo (1988), para a estimativa da ordem de grandeza dos recalques por adensamento, deve-se fazer um estudo sobre a espessura, posição e natureza das camadas constituintes desse solo, o nível do lençol freático, a distribuição de tensões e as propriedades dos solos que lhe interessam. Para obtenção de recalques por consolidação, propõe-se a realização de ensaios de adensamento, pois, a partir do mesmo determina-se as características do solo experimentalmente (CAPUTO, 1988).

Para que haja maior representatividade da real situação em campo, as amostras coletadas para o ensaio de adensamento devem ser indeformadas, configurando fielmente as características como estrutura, fissuração, tamanho das partículas, teor de umidade e índice de vazios do solo em análise (ABNT, 2020). Podem ser extraídas em blocos de solo ou por

cravação de tubo amostradores de paredes finas e devem ser transportadas e armazenadas com cuidado para que não sofram interferências externas (CLAYTON; MATTHEWS; SIMONS, 1995).

O ensaio de adensamento ou edométrico, consiste na medição das variações volumétricas do solo conforme submetido a diferentes estágios de pressão, e análise do tempo necessário para que a consolidação ocorra. Como resultado desse ensaio, obtém-se os coeficientes de recompressão e de compressibilidade, que são utilizados para determinar a magnitude dos recalques, e o coeficiente de adensamento que serve para estimar o tempo para a deformação que ocorra (ABNT, 2020).

A análise de deformações no solo a partir do ensaio de adensamento é de ampla utilização nos projetos geotécnicos, considerando-se como o método convencional para estimar parâmetros e caracterizar o material. Apesar disto, Fellenius (2006) apresenta o Método de Janbu para estimar recalques em ensaios *in situ* de piezocone (CPTU), que a partir da resistência de ponta corrigida (qt) resultante, fornece os parâmetros, número de módulo ou módulo na reta virgem (m) para os trechos de deformações plásticas e módulo de recompressão (mr) para os trechos de deformações elásticas. O método de Janbu apresenta, ainda, uma correlação para os parâmetros m e mr com os coeficientes de compressibilidade, de recompressão e índice de vazios obtidos no ensaio de adensamento, permitindo a comparação dos recalques gerados no método convencional de adensamento com o método de Janbu em ensaios de piezocone.

A vantagem na aplicabilidade do método de Janbu pelo ensaio de piezocone reside na análise de micro camadas, para cada leitura do ensaio de piezocone, levando em consideração a interferência da não homogeneidade dos solos. Por levar em conta apenas um parâmetro de projeto para estimar recalques, que pode ser obtido diretamente dos resultados e medidas do ensaio de CPTU, juntamente com a obtenção do perfil estratigráfico, este método simplifica a estimativa de recalques a apenas um ensaio, justificando-se do ponto de vista econômico a aplicabilidade (FELLENIOUS, 2006).

A apresentação do método de Janbu, disposto neste trabalho, será baseada na literatura de Fellenius (2006), chamada de Basics of Foundation Design (Fundamentos Básicos de Projetos de Fundações). Para abordar os fundamentos de mecânicas dos solos e de ensaios de campo, far-se-á, principalmente, uso das obras de Das (2007), Caputo (1988), Pinto (2006) e Schnaid e Odebrecht (2012).

A proposta deste trabalho consiste na comparação dos recalques obtidos por quatro diferentes metodologias: método convencional por adensamento primário unidimensional, método de Janbu derivado dos parâmetros do ensaio de adensamento, método de Janbu em

ensaios de CPTU com parâmetros definidos por tabela de valores típicos em Fellenius (2006) e método de Janbu em ensaios de CPTU com parâmetros calculados para cada medição de um perfil de piezocone. Utilizou-se de resultados de 20 verticais de ensaios de piezocone, os quais coletaram-se 25 amostras em determinadas camadas de solos finos para realizar ensaios de adensamento, possibilitando a obtenção dos recalques pelos diferentes métodos.

1.1. OBJETIVOS

Para investigar a possibilidade de se estimar recalques por correlações dos ensaios de piezocone e de adensamento de solos finos, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Determinar a magnitude de recalques em camadas de solos finos a partir de correlações entre os resultados de adensamento para o Método de Janbu e comparar com os obtidos pelo Método de Janbu pelo ensaio de CPTU.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar os parâmetros necessários das amostras para determinar recalques pelos ensaios de adensamento e de piezocone pelo método de Janbu;
- Comparar os parâmetros da literatura e a magnitude dos recalques pelo Método de Janbu nos ensaios de CPTU e pelo ensaio adensamento primário;
- Validar o uso do método de Janbu para estimar recalques pelos diferentes ensaios.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados conceitos fundamentais para a determinação de recalques em solos finos. Primeiramente, pretende-se identificar a importância da investigação geotécnica de campo para obras de engenharia e analisar aspectos do comportamento geotécnico do material desta pesquisa. Em seguida, serão contemplados os conceitos dos ensaios de adensamento e de piezocone, para que então se possa apresentar o Método de Janbu para obtenção de estimativas de recalques em solos finos.

2.1. INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), uma campanha de investigação geotécnica deve levar em consideração a complexidade da obra e os aspectos geológicos-geotécnicos referentes à origem do solo. Para a definição da melhor abordagem para a exploração do subsolo, deve-se ainda considerar fatores como a natureza dos materiais e condições das águas subterrâneas, as restrições topográficas, limitações de tempo, requisitos ambientais, restrições orçamentárias, objetivo e escopo da investigação, grau de perturbação da vizinhança e restrições políticas (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2001).

O conhecimento do perfil estratigráfico pode ser estabelecido por ensaios de campo, identificando camadas de solos finos, possibilitando a coleta de amostras para ensaios de laboratórios, para determinar parâmetros geotécnicos por correlações empíricas e teóricas. No Quadro 1, encontram-se os ensaios usualmente utilizados para avaliar o comportamento dos solos, destacando aqueles frequentemente encontrados no Brasil: os ensaios de campo de Sondagem à Percussão (SPT), Cone (CPT), Piezocone (CPTU) e Palheta (Vane Test) e os ensaios de laboratório de caracterização de solos, adensamento e triaxiais (em menor ocorrência). O Quadro 1 também indica os principais objetivos destes ensaios e parâmetros que podem ser obtidos por meio deles.

Os ensaios de campo são abordados por métodos diretos e indiretos, devendo ser escolhidos conforme a técnica de ensaio utilizada, tipo de solo investigado, normas e códigos específicos, bem como, práticas regionais. Ao trabalhar com depósitos argilosos e/ou solos moles, indica-se o uso de ensaios *in situ* como o de palheta e o de piezocone, pois, permitem identificar com melhor precisão a estratigrafia do solo, as poropressões e parâmetros, como a resistência não drenada (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Os ensaios laboratoriais servem comumente para a caracterização do solo e a determinação de parâmetros geotécnicos, para que o dimensionamento de projetos da área se apresente com maior precisão (ALMEIDA; MARQUES, 2010). O ensaio de laboratório a ser salientado nesta pesquisa é o de adensamento, que consiste em analisar a variação do índice de vazios, devido a aplicação de diferentes tensões normais por determinados períodos, permitindo, como resultado, quantificar o recalque sofrido pelos solos finos e uma previsão de tempo para que ocorra.

Quadro 1 – Principais ensaios de campo e de laboratório

Ensaio	Tipo	Objetivo	Parâmetros obtidos
In situ	Sondagem à Percussão (SPT)	Resistência à penetração do amostrador SPT para caracterização e classificação dos solos	N_{spt}, φ', Su
	Ensaio de Cone (CPT)	Resistência de ponta e atrito lateral para caracterização e classificação dos solos	qc, ft, Su
	Ensaio de Piezocone (CPTU)	Resistência de ponta, poropressão e atrito lateral para caracterização e classificação dos solos	$qt, ft, u, Ic, \varphi', G\theta, Su, \sigma'_{vm}, OCR$
	Palheta (Vane Test)	Resistência não drenada e sensibilidade de solos finos	Su, St, OCR
	Dilatômetro (DMT)	Módulo dilatométrico	$Ed, E, Su, OCR, K\theta, \varphi'$
	Pressiômetro (PMT)	Parâmetros elástico-plásticos do solo	$E, G\theta, Su, \psi, \varphi'$
Laboratório	Caracterização	Caracterização geral do solo e interpretação dos demais ensaios	W_n, LL, LP, G <i>Granulometria</i>
	Adensamento	Cálculo da magnitude e do tempo de recalque	$Cc, Cr, Cv, \sigma'_{vm}, eo$
	Cisalhamento Direto	Determinar parâmetros de resistência ao cisalhamento	c', φ'
	Triaxial	Determinar parâmetros de resistência ao cisalhamento	$c', \varphi', Su^*, G\theta$
	*Triaxial do tipo UU (Não consolidado e não-drenado)		

Fonte: Adaptado de Almeida e Marques (2010, p. 55).

2.2. AVALIAÇÃO DE RECALQUES

O solo é composto por partículas sólidas, espaços vazios preenchidos de ar e água, podendo, a deformação volumétrica ser causada pela compressão das partículas sólidas, pela compressão dos espaços vazios do solo e/ou pela compressão da água existente nos vazios. Assim, o recalque total sofrido pelo material será a soma do recalque elástico, da consolidação por recalque primário e da consolidação por recalque secundário (DAS, 2007).

Segundo Carneiro (2014), os recalques elásticos são estabelecidos pelo somatório de deformações verticais, resultantes das variações de tensões no carregamento, sem qualquer alteração no teor de umidade, e a magnitude dependerá da flexibilidade da fundação e do tipo de material do subsolo. As formulações para esse tipo de recalque são baseadas na Teoria da elasticidade e nas propriedades de elasticidade do solo, como, o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) (DAS, 2007).

Os solos argilosos possuem partículas muito pequenas quando comparados com solos granulares, portanto, apresentando uma maior área de superfície específica e uma alta capacidade de adsorção de água, permitindo a característica de plasticidade do material. Os finos são constituídos essencialmente por argilominerais, de complexa estrutura, que influenciam diretamente nesta capacidade de adsorção, pois, a superfície da partícula sólida carregará uma carga negativa que, quando em presença de água, apresentará uma força de ligação com a molécula de água (PINTO, 2006).

Segundo Das (2007), ao submeter uma camada de argila saturada a um carregamento, o recalque elástico acontecerá imediatamente, porém, devido à baixa permeabilidade, a expulsão da água dos vazios acontecerá lentamente, portanto, a alteração volumétrica continuará ocorrendo por consolidação. A transição do adensamento primário para o secundário, dar-se-á, quando as pressões neutras causadas pelo carregamento se dissiparem, e o esqueleto sólido começar a se deformar lentamente, sob tensão efetiva constante, onde, as partículas se rearranjarão em uma posição mais estável (BARAN, 2014).

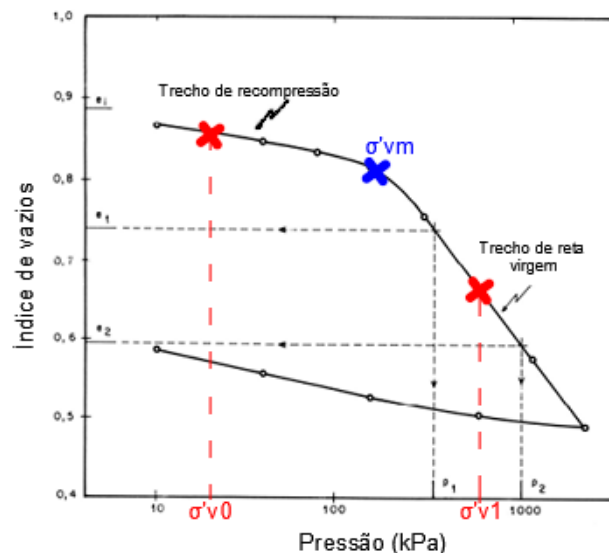
Os recalques em argilas dependem diretamente do histórico da máxima tensão efetiva vertical sofrida pelo solo, assim, necessita-se verificar se a pressão efetiva de sobrecarga existente no momento da coleta da amostra será maior ou igual à submetida anteriormente (DAS, 2007). Quando a tensão gerada pelo carregamento externo for menor que a tensão de pré-adensamento, a deformação do solo estará no trecho de recompressão, com deformações elásticas e pequenas variações no índice de vazios, e quando for maior, estará no trecho de

compressão virgem, com deformações plásticas e apresentando maiores variações no índice de vazios, consequentemente, maiores magnitudes de recalques (BARAN, 2014).

Existe um fator para determinar se o solo se comporta como normalmente adensado ou pré-adensado (sobreconsolidado), chamado de razão de pré-adensamento (*OCR*), estabelecido pela divisão da pressão de pré-adensamento do corpo de prova sobre a tensão vertical efetiva presente. Para valores de *OCR* acima de 1, diz-se que o material se apresenta pré-adensado, com poucas deformações e reversíveis, e para *OCR* igual a 1, o solo é dito como normalmente adensado, com grandes deformações e irreversíveis (DAS, 2007).

Segundo Almeida e Marques (2010), a magnitude do recalque por adensamento primário deve ser calculada pela separação de camadas homogêneas no perfil com o uso dos dados obtidos no ensaio de adensamento. O cálculo da deformação vertical por adensamento primário de uma camada de espessura *H*, com a tensão de pré-adensamento σ'_{vm} , a tensão vertical efetiva inicial σ'_{v0} e a tensão vertical efetiva final σ'_{v1} é realizado pela Equação 1. A Figura 1 apresenta os trechos de recompressão e trecho da curva de adensamento, bem como, a indicação das tensões supracitadas (PINTO, 2006).

Figura 1 – Recalque nos trechos de recompressão e de reta virgem



Fonte: Adaptado de ABNT (2020, p. 12).

$$\rho = \frac{H}{1 + e_0} \cdot \left(C_r \cdot \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} + C_c \log \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{vm}} \right) \quad (1)$$

Onde:

ρ = Recalque por adensamento primário (m);

H = Espessura da camada compressível (m);

e_0 = Índice de vazios;

C_c = Coeficiente de compressão;

C_r = Coeficiente de recompressão;

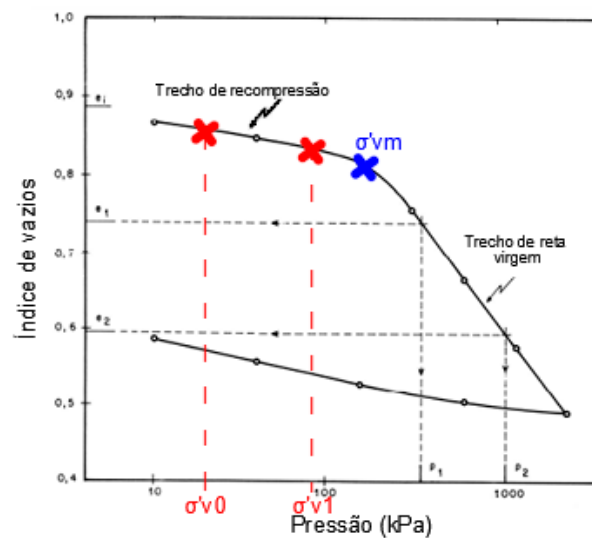
σ'_{vm} = Tensão de pré-adensamento (kPa);

σ'_{v0} = Tensão efetiva vertical inicial (kPa);

σ'_{v1} = Tensão efetiva vertical final (kPa).

Os parâmetros necessários para a Equação 1 são obtidos a partir do ensaio de adensamento (edométrico), que será apresentado no item 2.3 deste trabalho. Quando o material apresenta a tensão efetiva inicial e final com valores inferiores à tensão de pré-adensamento, o seu comportamento permanecerá no trecho de recompressão, sendo os recalques definidos pela aplicação da Equação 2. Neste caso, as tensões aplicadas ao solo se apresentarão conforme indicado esquematicamente na Figura 2.

Figura 2 – Recalque no trecho de recompressão



Fonte: Adaptado de ABNT (2020, p. 12).

$$\rho = \frac{H}{1 + e_0} \cdot \left(C_r \log \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (2)$$

Onde:

ρ = Recalque por adensamento primário (m);

H = Espessura da camada compressível (m);

e_0 = Índice de vazios;

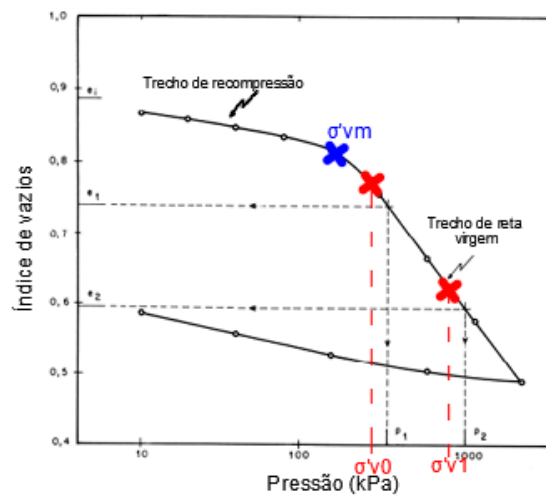
C_r = Coeficiente de recompressão;

σ'_{v0} = Tensão efetiva vertical inicial (kPa);

σ'_{v1} = Tensão efetiva vertical final (kPa).

Ainda, para o caso em que as tensões iniciais e finais sejam superiores a tensão de pré-adensamento, deve-se aplicar a Equação 3, verificando-se toda compressibilidade no trecho de reta virgem na curva de adensamento, conforme apresentado na Figura 3. Neste caso, pode-se dizer que a magnitude de recalque será maior que o caso da aplicação da Equação 2, pois as tensões presentes na partícula de solo estarão com valores superiores ao histórico de tensões por ela sofrido.

Figura 3 – Recalque no trecho de reta virgem



Fonte: Adaptado de ABNT (2020, p. 12).

$$\rho = \frac{H}{1 + e_0} \cdot \left(C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (3)$$

Onde:

ρ = Recalque por adensamento primário (m);

H = Espessura da camada compressível (m);

e_0 = Índice de vazios;

C_c = Coeficiente de compressão;

σ'_{v0} = Tensão efetiva vertical inicial (kPa);

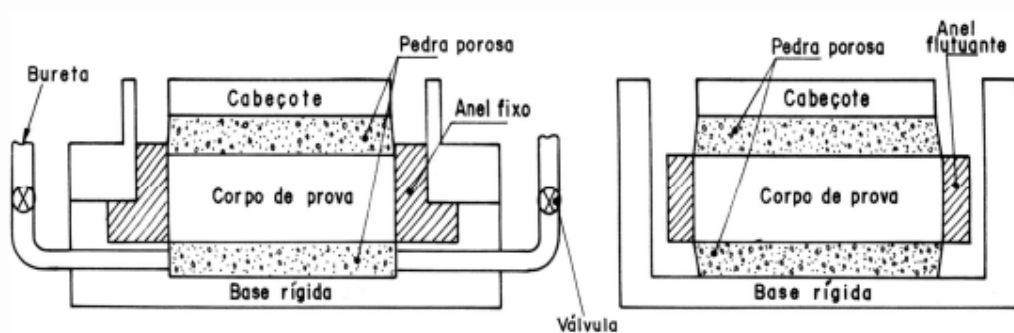
σ'_{v1} = Tensão efetiva vertical final (kPa).

2.3. ENSAIO DE ADENSAMENTO

O ensaio de adensamento unidimensional é regido pela NBR 16853 (2020), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e será a base normativa para a descrição dos procedimentos deste item do trabalho. O objetivo principal do ensaio é avaliar o comportamento de um material coesivo e saturado, mantido confinado lateralmente, e carregado axialmente em incrementos, com pressão constante em cada incremento, até que todo excesso de poropressão dissipe. Para que o solo ensaiado apresente resultados condizentes com a realidade em campo, o corpo de prova deve ser coletado por amostras de solo indeformadas, com as devidas proteções, para que não haja perturbação e nem perda de umidade para o ambiente (ABNT, 2020).

De acordo com ABNT NBR 16853:2020, para começar o ensaio propriamente dito, monta-se o corpo de prova na célula de adensamento, entreposto a duas pedras porosas, conforme ilustrado na Figura 4. Com o auxílio de um extensômetro são realizadas leituras de variação de altura do corpo de prova, para os diferentes estágios de carga, nos intervalos de tempo indicados na normativa. Completadas as leituras correspondentes ao máximo carregamento empregado, efetua-se o descarregamento do corpo-de-prova em no mínimo três estágios, também registrando-se as leituras do extensômetro para os descarregamentos.

Figura 4 – Representação esquemática da célula de adensamento

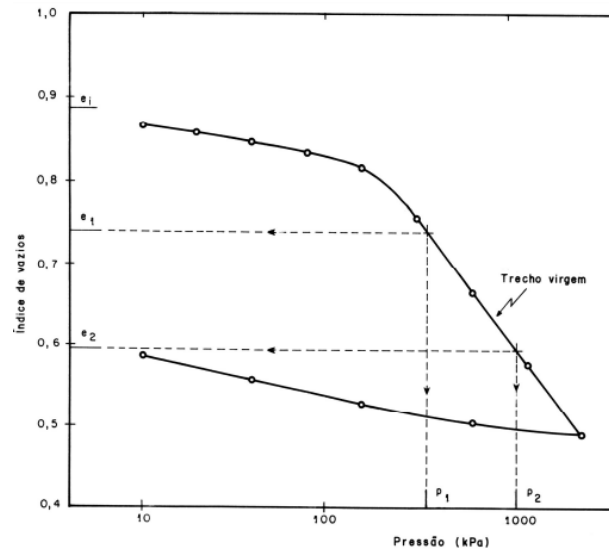


Fonte: ABNT (2020, p. 2).

Os dados obtidos serão a relação dos valores de altura de corpo de prova por tempo para cada estágio de pressão e índices físicos do solo ensaiado. Quando manipuladas, estas

informações permitem a obtenção da curva de adensamento (índice de vazios por pressão) que indica a carga de pressão aplicada, em kPa, no eixo das abscissas em escala logarítmica e o respectivo índice de vazios, no eixo das ordenadas. Segue exemplo, na Figura 5, de uma curva de adensamento.

Figura 5 – Exemplo de curva de adensamento

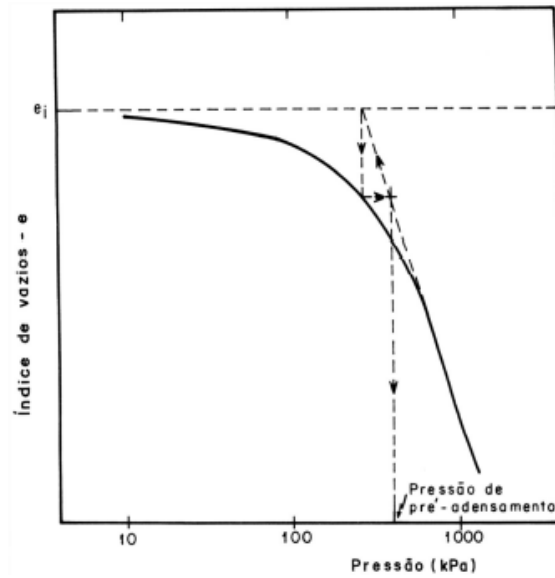


Fonte: ABNT (2020, p. 12).

De acordo com Pinto (2006), na curva de adensamento, a tensão efetiva, que delimita a transição do trecho de recompressão para o trecho de reta virgem, é denominada como a tensão de pré-adensamento, sendo a máxima tensão a que o solo, até então, foi submetido. O parâmetro influencia diretamente na magnitude do recalque que este solo pode apresentar, pois, em situações que o corpo de prova for submetido a tensões maiores que a de pré-adensamento, a variação do índice de vazio será significativa e a relação de $e-\log\sigma'$ será praticamente linear, com uma inclinação mais acentuada (trecho virgem indicado na Figura 5) (DAS, 2007).

Segundo ABNT NBR 16853:2020, a tensão de pré-adensamento pode ser determinada pelo método de Pacheco Silva, que consiste em inicialmente traçar uma reta horizontal no valor do índice de vazios inicial na curva de adensamento e no prolongamento da reta virgem, de forma que estas retas se interceptem. Seguindo do ponto de interseção, traçar uma reta na vertical, em direção a curva de adensamento, e desse ponto, para novamente, a reta de prolongamento do trecho virgem. O ponto encontrado ao ser conduzido até o eixo das abscissas dará o valor de tensão de pré-adensamento, como demonstrado no Figura 6 (ABNT, 2020).

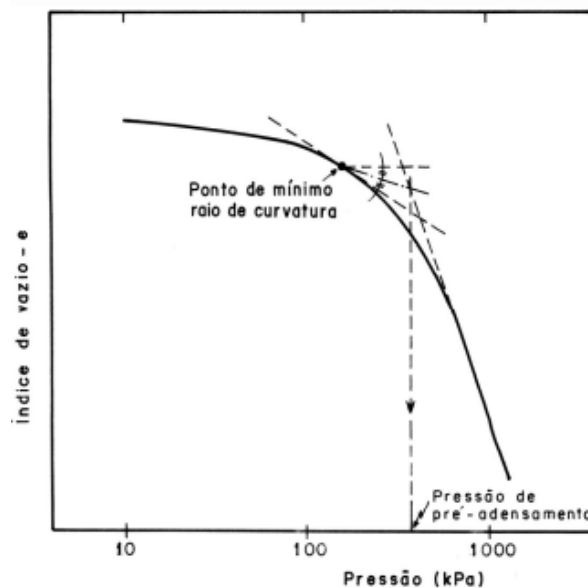
Figura 6 – Exemplo de tensão de pré-adensamento pelo método de Pacheco Silva



Fonte: ABNT (2020, p. 14).

A norma ABNT NBR 16853:2020 apresenta um segundo processo para a obtenção da pressão de pré-adensamento, o método de Casagrande. O procedimento baseia-se em estipular o ponto de mínimo raio de curvatura, traçar uma reta paralela ao eixo das abscissas e outra tangente à curva, acrescentando uma reta na bissetriz do ângulo entre as traçadas. A interseção desta reta com o prolongamento do trecho virgem, fornecerá o ponto em que corresponderá à tensão de pré-adensamento, conforme exemplificado na Figura 7.

Figura 7 – Exemplo de tensão de pré-adensamento pelo método de Pacheco Silva



Fonte: ABNT (2020, p. 13).

Ainda, referente aos parâmetros fornecidos pela curva de adensamento, para o cálculo de recalques, de acordo com a ABNT NBR 16853:2020, deve-se estabelecer o coeficiente de recompressão, o qual representa a taxa de variação do índice de vazios em relação às tensões geradas dentro da região de recompressão e pode ser estipulado pela expressão 4.

$$C_r = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} \quad (4)$$

Onde:

C_r = coeficiente de recompressão;

e_1, e_2 = índices de vazios escolhidas na reta de recompressão;

σ_1, σ_2 = tensões escolhidas na reta de recompressão.

O coeficiente de compressibilidade representa a taxa de variação do índice de vazios em relação às tensões efetivas dentro da região da reta virgem, determinado pela Equação 5 (ABNT, 2020).

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} \quad (5)$$

Onde:

C_c = coeficiente de compressibilidade;

e_1, e_2 = índices de vazios escolhidas na reta virgem;

σ_1, σ_2 = tensões escolhidas na reta virgem.

Segundo Almeida e Marques (2010), os resultados das amostras adensadas dependem diretamente da qualidade da amostra indeformada coletada. O amolgamento do solo interfere diretamente na curva de adensamento, podendo subestimar os valores de tensão de pré-adensamento e acarretar estimativas de recalques de projeto muito diferentes dos verificados em campo (ALMEIDA; MARQUES, 2010).

Para isto, diferentes autores estabeleceram critérios para avaliação da qualidade da amostra, o qual baseia-se na classificação da amostra pela razão entre a variação do índice de vazios do início do ensaio até a tensão vertical efetiva *in situ* pelo índice de vazios correspondente à tensão vertical efetiva, por intervalos de *OCR* (ALMEIDA; MARQUES,

2010). A Tabela 1 apresenta diferentes valores estabelecidos nas literaturas para a classificação da qualidade das amostras.

Tabela 1 – Critérios para classificação da qualidade de amostra

OCR	$\Delta e / e_o$			
	Muito boa a excelente	Boa a regular	Ruim	Muito ruim
Critério de Lunne, Berre e Strandvik (1997)				
1-2	<0,04	0,04-0,07	0,07-0,14	>0,14
2-4	<0,03	0,03-0,05	0,05-0,10	>0,10
Critério de Sandroni (2006b)				
<2	<0,03	0,03-0,05	0,05-0,10	>0,10
Critério de Coutinho (2007)				
1-2,5	<0,05	0,05-0,08	0,08-0,14	>0,14

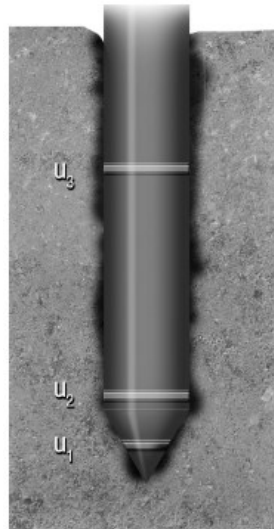
Fonte: Almeida e Marques (2010, p. 75).

2.4. ENSAIO DE PIEZOCONE (CPTU)

O ensaio de piezocone (CPTU – *Cone penetration test with pore pressure measurement*) é muito indicado para a realização de investigações de subsolos que apresentem depósitos de materiais compressíveis, com baixa capacidade de suporte de cargas. Permite a determinação do perfil estratigráfico do solo, das propriedades geotécnicas do solo e uma previsão da capacidade de carga em fundações (HEIDEMANN, 2021).

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), o método consiste na cravação de uma ponteira cônica, com vértice de 60°, a uma velocidade constante de 20 ± 5 mm/s e com seção transversal de 10 cm², geralmente, com um sistema hidráulico de cravação. O registro contínuo da resistência à penetração permite uma descrição detalhada do perfil estratigráfico do subsolo e, por se tratar de uma abordagem mais automatizada que os demais ensaios de campo, garante uma melhor precisão nas medidas de resistência de ponta (q_c), de atrito lateral (f_s) e de pressões neutras na ponta, na base ou na luva (u_1 , u_2 e u_3) (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). A Figura 8 apresenta as posições em que os elementos filtrantes se encontram para medir as poropressões citadas, sendo a mais comumente medida a pressão neutra u_2 .

Figura 8 – Posição dos elementos filtrantes para obtenção de u_1 , u_2 e u_3



Fonte: Schnaid; Odebrecht (2012, p. 73).

A cravação da ponteira é realizada com o auxílio de hastes metálicas, com comprimentos de 1 metro, onde, as células de medição instaladas na ponteira enviam sinais analógico por cabos, dispostos no interior do equipamento e das hastes, até chegar a um conversor digital, ligado a um microcomputador, em superfície. Com o auxílio de um software, é possível registrar as leituras das células de carga e armazenar as informações em arquivos para futura análise dos dados (KLAHOLD, 2013).

Os parâmetros medidos pelo ensaio são a resistência de ponta (q_c), o atrito lateral (f_s) e a poropressão (u_2). Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), deve-se realizar uma correção na resistência de ponta (q_c) em relação a poropressão (u_2) atuante nas áreas desiguais da geometria do cone, aplicando a Equação 6, especialmente para determinar as propriedades em argilas moles. Na Figura 10, segue apresentado um exemplo típico de resultado de ensaio de CPTU, com a resistência de ponta corrigida.

$$q_t = q_c + (1 - a) \cdot u_2 \quad (6)$$

Onde:

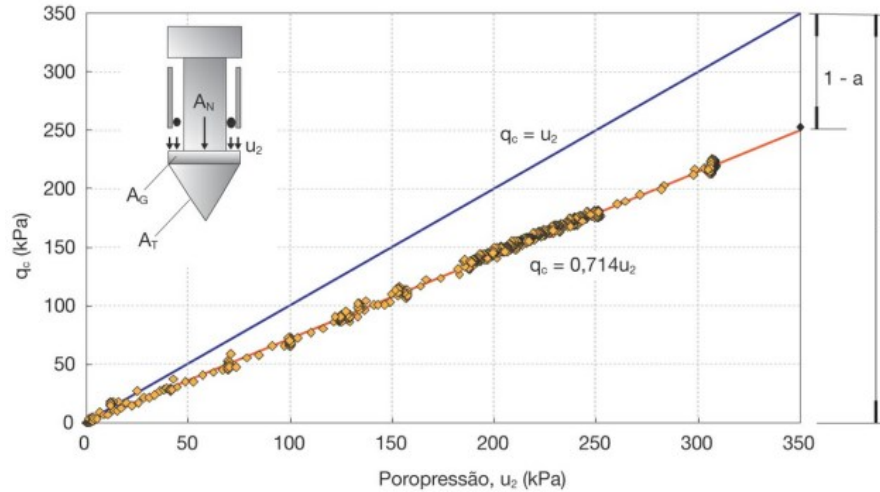
q_t = Resistência de ponta corrigida;

q_c = Resistência de ponta;

u_2 = Pressões neutras na base do cone;

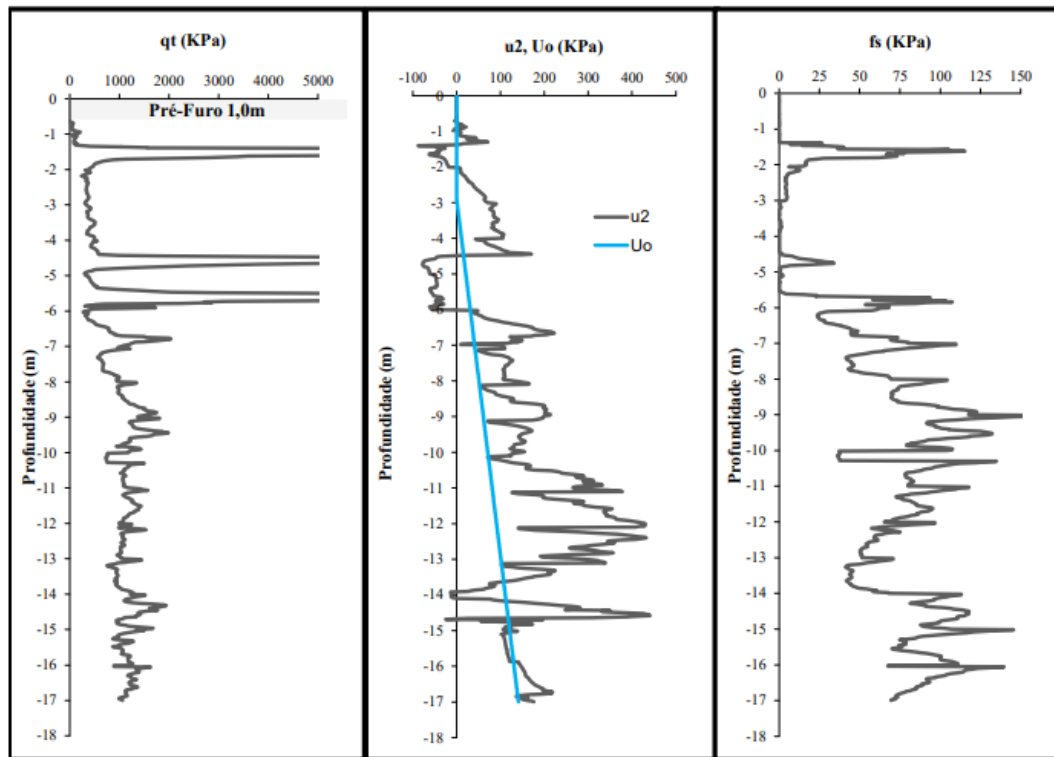
a = Razão entre as áreas desiguais obtido com a calibração do piezocone, onde $a = A_n/A_t = \text{Área interna da seção transversal} / \text{Área externa da seção transversal}$, conforme Figura 9.

Figura 9 - Correções impostas às medidas de ensaios de piezocone



Fonte: Schnaid; Odebecht (2012, p. 88).

Figura 10 – Exemplo de resultado de ensaio de CPTU



Fonte: Adaptado de Geofoma Engenharia Ltda (2022).

Diversos autores citam como desfavorável o fato de o ensaio de cone e piezone não realizar a coleta de amostras, o que auxiliaria na identificação e classificação do perfil estratigráfico (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Buscando solucionar esta desvantagem, foi proposta por Robertson e Write (1998), a Equação 9, a qual classifica os solos com os parâmetros de resistência normalizada da ponta do cone (Q_{tn}) e razão de atrito normalizada (F_r), levando em consideração fatores como tensão vertical, poropressão, resistência de ponta e atrito lateral, conforme as expressões 7 e 8 que se seguem. A Figura 11 ilustra um exemplo de perfil de CPTU com a classificação dos solos pelo índice I_{cRW} .

$$Q_{tn} = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma_{atm}} \cdot \left(\frac{\sigma_{atm}}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (7)$$

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})} \cdot 100\% \quad (8)$$

$$I_{cRW} = \sqrt{[3,47 - \log Q_{tn}]^2 + [1,22 + \log F_r]^2} \quad (9)$$

Onde:

I_{cRW} = Classificação do solo, segundo Robertson e Write (1998);

Q_{tn} = Resistência normalizada da ponta do cone;

F_r = Razão de atrito normalizada;

q_t = Resistência de ponta corrigida;

f_s = Atrito lateral;

σ_{v0} = Tensão vertical no ponto;

σ'_{v0} = Tensão vertical efetiva no ponto;

$\sigma_{atm} = 1 \text{ atm} = 100 \text{ kPa}$;

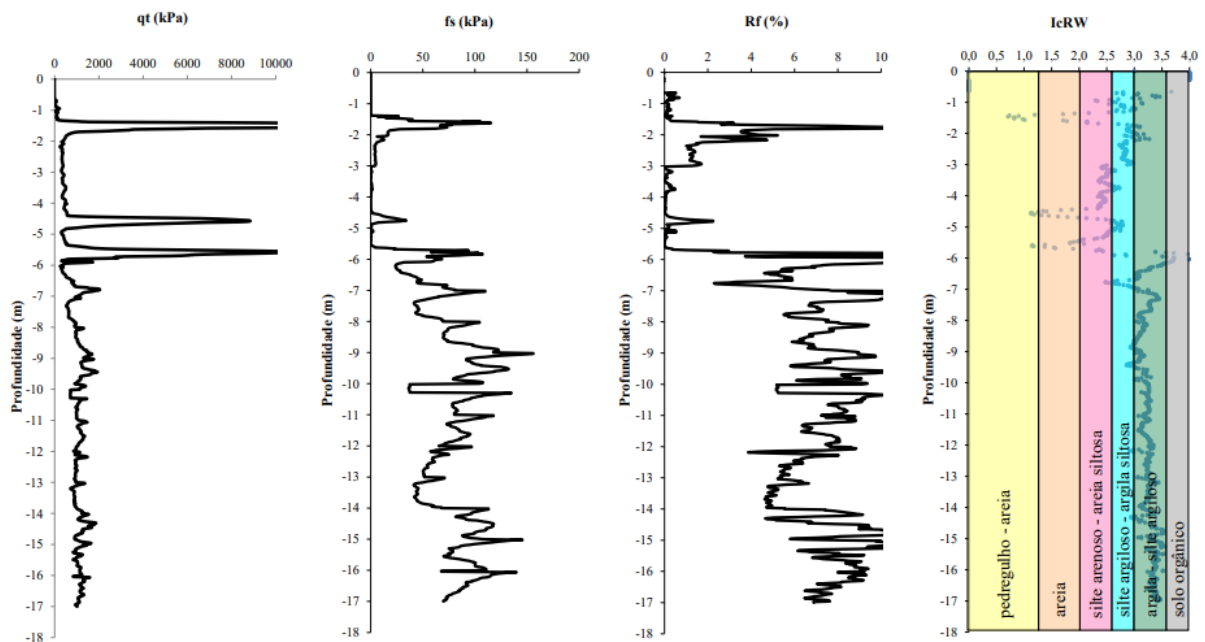
$n = 1$ para argilas e $0,75$ para siltes.

Para cada intervalo de I_{cRW} obtido no perfil de CPTU pode-se classificar os solos e estabelecer camadas com comportamentos homogêneos, conforme elencado no Quadro 2, onde materiais finos encontram-se com valores superiores a 2,60 e solos mais grosseiros encontram-se com valores inferiores a este.

Quadro 2 – Classificação do solo segundo o índice $IcRW$

Índice $IcRW$	Classificação do solo
$IcRW > 3,60$	Argilas orgânicas
$2,95 > IcRW > 3,60$	Argilas
$2,60 > IcRW > 2,95$	Mistura de siltes
$2,05 > IcRW > 2,60$	Mistura de areias
$1,31 > IcRW > 2,05$	Areias
$IcRW < 1,31$	Areias com pedregulhos

Fonte: Adaptado de Schnaid; Odebrecht (2012, p. 94).

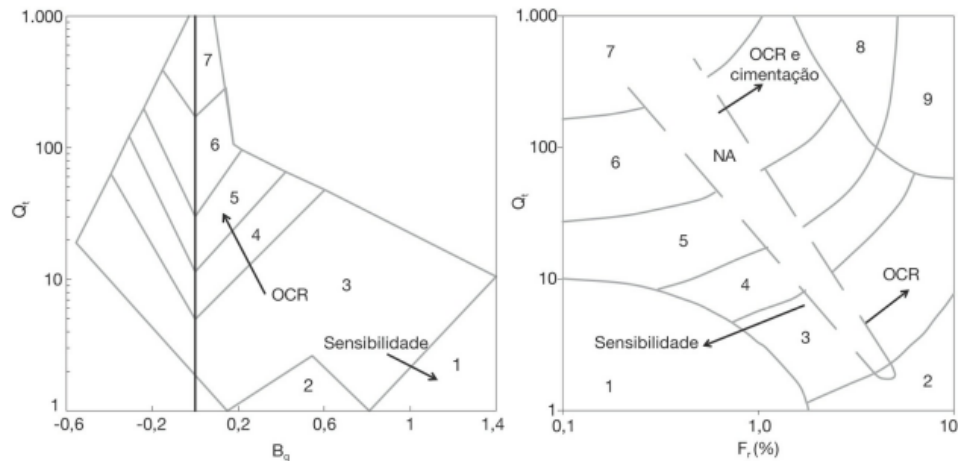
Figura 11 – Exemplo de classificação dos solos pelo $IcRW$ para perfil obtido de CPTU

Fonte: Adaptado de Geoforma Engenharia Ltda (2022).

Existem ainda dois parâmetros complementares que auxiliam na classificação dos solos nos ensaios de CPTU, o parâmetro de poropressão Bq e a razão de atrito Rf . Os autores Jefferies e Davies (1993), propuseram a classificação dos solos pelo índice Ic , definido na Equação 10, e dos ábacos de $Bq \times Qt$ e $Fr \times Qt$, conforme Figura 12.

$$I_c = \sqrt{\{3 - \log[Q_t \cdot (1 - B_q)]\}^2 + [1,5 + 1,3 \cdot (\log F_r)]^2} \quad (10)$$

Figura 12 – Ábaco para classificação do solo segundo Jefferies e Davies (1993)



Fonte: Schnaid; Odebrecht (2012, p. 91).

O ensaio de piezocone permite, também, obter a magnitude da tensão de pré-adensamento do solo, fator que interfere diretamente nas deformações verticais dos solos, especialmente em argilas moles (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Para determinar a tensão de sobreconsolidação, deve-se utilizar a Equação 11.

$$\sigma'_{vm} = K_1 \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (11)$$

Onde:

σ'_{vm} = Tensão de pré-adensamento;

$K_1 = 0,1$ a $0,5$ para as diferentes argilas (Quadro 3 apresenta valores típicos para diferentes locais, segundo a literatura);

q_t = Resistência de ponta corrigida;

σ_{v0} = Tensão vertical no ponto.

Quadro 3 - Valores de K_1 das argilas brasileiras

Local	γ_n (kN/m ²)	K_1	Referência
Duque de Caxias (RJ)	12,8	0,143	Futai, Almeida e Lacerda (2001 apud Massad, 2009)
Recife (PE) Camada 1	15,6	0,222	Coutinho, Oliveira e Oliveira (2000 apud Massad, 2009)
Recife (PE) Camada 2	16,6	0,244	Coutinho, Oliveira e Oliveira (2000 apud Massad, 2009)

Local	γ_n (kN/m²)	$K1$	Referência
Santa Catarina (SC)	13,6	0,263	Oliveira et al. (2001 apud Massad, 2009)
Santos (SP)	15,0	0,180	Odebrecht, Schnaid e Mantaras (2012)
Porto Alegre (RS)	14,0	0,301	Soares (1997)

Fonte: Adaptado de Schnaid; Odebrecht (2012, p. 99).

2.5. MÉTODO DE JANBU PARA ESTIMATIVA DE RECALQUES

O método de Janbu foi desenvolvido pelo engenheiro Nilmar Oskar Charles Janbu na década de 60, e combina os princípios básicos do comportamento de tensão-deformação elástica linear e não-linear, aplicando em diferentes tipos de materiais. Para isto, propõe o uso de dois parâmetros, o expoente de tensão (j) e o número de módulo (m), separando os equacionamentos de deformações verticais por materiais com comportamentos distintos (FELLENIUS, 2006).

O expoente de tensão varia de acordo com a classificação do solo, sendo valores maiores que zero para solo não coesivos, no caso 1 para materiais grosseiros e densos e 0,5 para as areias e siltes, e sendo nulo para os materiais coesivos, como as argilas (FELLENIUS, 2006). Como, a proposta deste trabalho é avaliar solos finos, este fator será desconsiderado nas análises, citando-o apenas por questões didáticas.

O número de módulo é a taxa de variação com que o solo se comprime no trecho virgem ao ser carregado, podendo ser determinado por ensaios in situ como o CPTU e por correlações com ensaios de adensamento. Para argilas pré-adensadas, propõe-se também o uso do número de módulo de recompressão (mr), que pode ser diretamente proporcional a 5 a 12 vezes o valor do número de módulo (m) (FELLENIUS, 2006). Como referência, a Tabela 2, apresenta uma gama de valores típicos para os diferentes tipos de solos, citados no Canadian Foundation Engineering Manual (1992).

Tabela 2 – Valores típicos de número de módulo (m)

Tipo de Solo	Número de Módulo (m)	Expoente de tensão (j)
Fragmentos de rocha	1000 - 300	$j = 1$
Pedregulhos	400 - 40	$j = 0,5$

Tipo de Solo		Número de Módulo (<i>m</i>)	Expoente de tensão (<i>j</i>)
Areia	Densa	400 - 250	<i>j</i> = 0,5
	Compacta	250 - 150	
	Fofa	150 - 100	
Silte arenoso	Denso	200 - 80	<i>j</i> = 0,5
	Compacto	80 - 60	
	Fofo	60 - 40	
Argila siltosa e Silte argiloso	Dura e rija	60 - 20	<i>j</i> = 0
	Rija e Média	20 - 10	
	Mole	10 - 5	
Argilas moles e Argilas orgânicas		20 - 5	<i>j</i> = 0
Turfas		5 - 1	<i>j</i> = 0

Fonte: Fellenius (2006, p. 3-8).

Segundo Fellenius (2006), uma grande vantagem do uso deste método para determinar recalques é a necessidade de estabelecer apenas um parâmetro, o número de módulo, para o caso de argilas, diferentemente do método tradicional, no qual existe a necessidade de obter o índice de compressão (*C_c*), de recompressão (*C_r*) e o índice de vazios inicial (*e₀*) da mesma amostra. Para isto, existe uma relação de conversão dos parâmetros de compressibilidade obtidos no ensaio de adensamento para o número de módulo. Este número de módulo relaciona-se ao coeficiente *C_c*, reflete a variação produzida por um dado intervalo de carregamento em termos de variação de índice de vazios *e*, conseqüentemente, recalques. Assim, é possível a aplicação do método de Janbu para estimativa de deformações verticais, conforme apresentado na Equação 12.

$$m = \ln 10 \frac{1 + e_0}{C_c} = 2,3 \frac{1 + e_0}{C_c} \quad (12)$$

Onde:

m = Número de módulo;

e₀ = Índice de vazios;

C_c = Coeficiente de compressão.

Massarsch (1994) propôs uma relação semi-empírica relacionando o número do módulo m com a resistência de ponta corrigida obtida no ensaio de piezocone (qt), conforme apresentado na Equação 13. O coeficiente de empuxo em repouso (K_0) é estabelecido pela Equação 14, sendo dependente do ângulo de atrito efetivo do solo. Em solos arenosos este ângulo de atrito costuma varia de 30° a 36° , correspondendo K_0 ao intervalo de 0,4 a 0,6. Para os solos em geral, K_0 pode variar de 0,5 a 5,0, deixando o termo $3/(1 + K_0)^{0,5}$ no intervalo de 1,2 a 0,8, podendo-se assim, aproximar-se ao valor de 1 unidade, gerando a Equação 15 (FELLENIOUS, 2006).

$$m = a \left[\left(\frac{qt}{(\sigma'_r \sigma'_{v0})^{0,5}} \right) \left(\frac{3}{1 + 2K_0} \right)^{0,5} \right]^{0,5} \quad (13)$$

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (14)$$

$$m = a \left[\left(\frac{qt}{(\sigma'_r \sigma'_{v0})^{0,5}} \right) \right]^{0,5} \quad (15)$$

Onde:

m = Número do módulo;

a = Coeficiente modificador, que depende do tipo de solo, conforme Tabela 3;

qt = Resistência de ponta corrigida;

σ'_r = Tensão de referência = 100 kPa;

σ'_{v0} = Tensão efetiva vertical no ponto;

ϕ' = Ângulo de atrito efetivo;

K_0 = Coeficiente de empuxo em repouso.

Tabela 3 - Coeficiente modificador (a) para diferentes tipos de solos

Tipo de solo	Coeficiente modificador (a)
Argila mole	3 *
Argila dura	5 *
Silte orgânico mole	7
Silte fofo	12

* Valores obtidos para argilas lacustres e marinhas normalmente consolidadas, para demais argilas os valores podem diferir em duas unidades.

Tipo de solo	Coefficiente modificador (<i>a</i>)
Silte compacto	15
Silte denso	20
Areia siltosa fofa	20
Areia fofa	22
Areia compacta	28
Areia densa	35
Pedregulho fofo	35
Pedregulho denso	45

Fonte: Fellenius (2006, p. 3-18).

A avaliação de recalque pelo método de Janbu segue a mesma prerrogativa que a de adensamento primário em comparar as tensões aplicadas com o histórico de tensões. Como em solos coesivos o expoente de tensão pode ser considerado nulo, a deformação vertical (ε) pode ser calculada pela Equação 16 para solos sobreconsolidados, pela Equação 17 em solos normalmente consolidados e pela Equação 18 em materiais em que as tensões não ultrapassem a tensão de pré-consolidação.

$$\varepsilon = \frac{1}{m_r} \ln \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} + \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{vm}} \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{v0}} \quad (17)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{m_r} \ln \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{v0}} \quad (18)$$

Onde:

ε = Deformação pelo Método de Janbu;

m = número de módulo;

m_r = número de módulo de recompressão (5 a 12 vezes de m para argilas e siltes);

σ'_{v0} = Tensão efetiva vertical inicial no ponto;

σ'_{v1} = Tensão efetiva vertical final no ponto;

σ'_{vm} = Tensão de pré-adensamento.

3. APRESENTAÇÃO DOS DADOS

No presente capítulo faz-se a apresentação das 25 amostras dos ensaios de adensamentos, coletadas com amostrador shelby, e das 20 verticais de CPTU, utilizadas para a aplicação do método de Janbu e do método tradicional por adensamento na estimativa de recalques. Trata-se de cinco obras realizadas na região litorânea do estado de Santa Catarina e uma obra do estado de Pernambuco, dispostas no Quadro 4 e caracterizadas no Quadro 5.

Quadro 4 – Disposição dos ensaios por obra

Obra	Local	Número de amostras	Número de verticais de CPTU
A	Joinville (SC)	5	5
B	Joinville (SC)	3	3
C	Biguaçu (SC)	5	3
D	São José (SC)	2	2
E	Navegantes (SC)	6	5
F	Camaragibe (PE)	4	2
Total		25	20

Fonte: autoria própria (2022).

Quadro 5 – Caracterização das amostras coletadas

Obra	CPTU	Amostra	Profundidade da coleta (m)	Classificação tátil-visual da amostra	Massa específica (g/cm³)
A	1	AM-01	1,50 a 2,10	Argila orgânica pouco arenosa preta	1,51
	5	AM-05	1,00 a 1,50	Argila arenosa cinza escura (presença de matéria orgânica)	1,81
	6	AM-06	1,00 a 1,50	Argila orgânica preta (turfa)	1,21
	7	AM-07	3,00 a 3,60	Argila orgânica cinza escura	1,33
	8	AM-08	1,00 a 1,60	Argila arenosa cinza clara (presença de matéria orgânica)	1,89
B	1	AM-01	3,40 a 4,00	Argila orgânica variegada (preta)	1,48
	2	AM-02	3,00 a 3,60	Argila arenosa cinza clara (presença de matéria orgânica)	1,69
	4	AM-04	3,10 a 3,70	Argila pouco arenosa variegada (cinza clara) (presença de matéria orgânica)	1,69

Obra	CPTU	Amostra	Profundidade da coleta (m)	Classificação tátil-visual da amostra	Massa específica (g/cm³)
C	1	AM-01	5,00 a 6,60	Argila cinza escura (presença de matéria orgânica)	1,42
	3	AM-03.1	2,45 a 3,00	Argila variegada (cinza escura) com mica (presença de matéria orgânica)	1,53
		AM-03.2	6,00 a 6,50	Argila cinza escura com mica (presença de matéria orgânica)	1,42
	4	AM-04.1	2,40 a 3,00	Argila variegada (amarela) com mica (presença de matéria orgânica)	1,57
		AM-04.2	4,40 a 5,00	Argila arenosa cinza escura (lentes arenosas)	1,61
D	1	AM-01	2,70 a 3,30	Silte arenoso variegado (amarelo) com mica (presença de caulinita)	1,71
	6	AM-06	2,40 a 3,00	Silte arenoso variegado (amarelo) (presença de caulinita)	1,62
E	10	AM-10	3,00 a 3,60	Silte argiloso cinza escuro com mica (presença de conchas marinhas)	1,46
	11	AM-11	4,80 a 5,40	Silte argiloso cinza escuro com mica	1,73
	12	AM-12.1	3,80 a 4,40	Argila arenosa cinza escura com mica (presença de conchas marinhas)	1,66
		AM-12.2	6,30 a 6,90	Argila arenosa cinza escura (presença de conchas marinhas)	1,71
	18	AM-18	3,90 a 4,35	Argila arenosa cinza escura (presença de conchas marinhas)	1,66
	19	AM-19	4,20 a 4,80	Argila arenosa cinza escura (presença de conchas marinhas)	1,56
F	10	AM-10.1	7,00 a 7,50	Argila orgânica marrom escura (presença de conchas marinhas) (Turfa)	1,29
		AM-10.2	11,00 a 11,50	Argila orgânica cinza escura	1,47
	32	AM-32.1	7,00 a 7,50	Argila orgânica marrom escura (Turfa)	1,10
		AM-32.2	11,00 a 11,50	Argila orgânica cinza escura	1,52

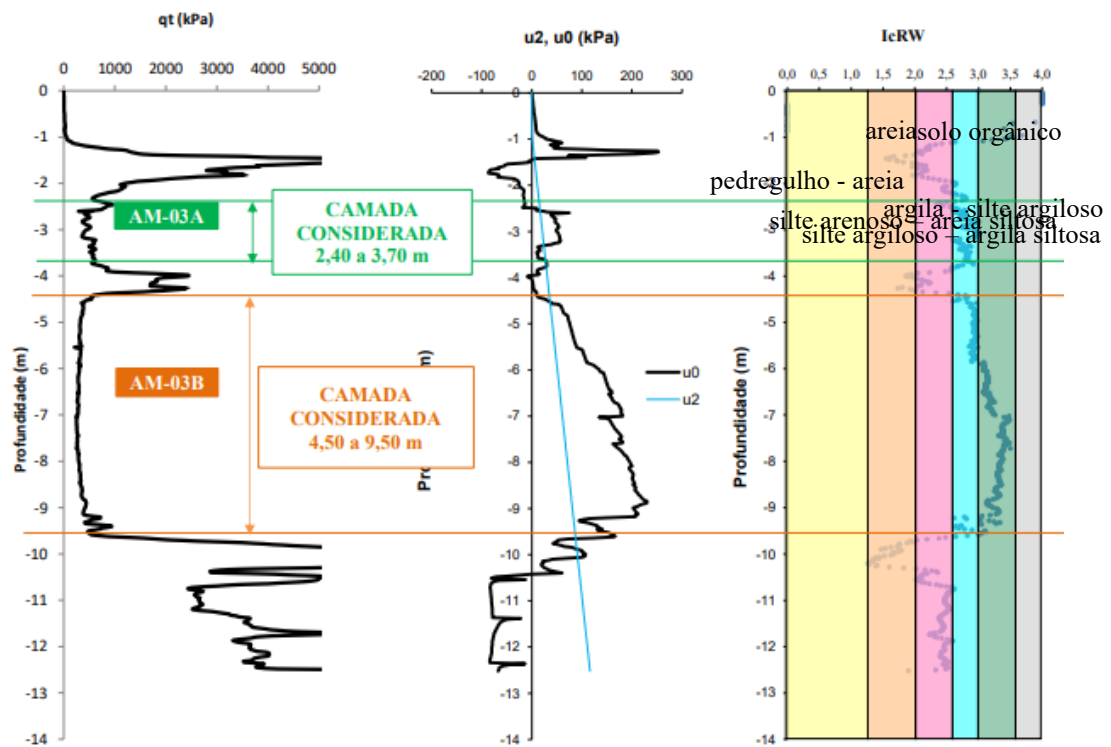
Fonte: autoria própria (2022).

Como se pode observar no Quadro 5, há disparidade no número de amostras provenientes do ensaio de adensamento em relação ao número de verticais. Isso acontece por

existirem cinco ensaios de CPTU, nos quais foi realizada a coleta de duas amostras por vertical. Nestes casos, sempre que as amostras demonstravam comportamentos distintos entre si, o perfil foi dividido em duas camadas e os recalques em cada camada foram calculados independentemente, sem a influência do recalque da outra camada, uma vez que, o objetivo do trabalho foi avaliar os resultados obtidos por diferentes metodologias de avaliação de recalques.

A Figura 13 exemplifica duas amostras retiradas da sondagem CPTU 03 da obra C, destacando as camadas compressíveis consideradas para calcular os recalques isoladamente pelo método de adensamento convencional e pelo método de Janbu pelo CPTU. As camadas foram definidas analisando-se regiões com baixos valores de resistência de ponta, poropressões elevadas e pela classificação $IcRW$, que representa o comportamento dos materiais, classificando-os como materiais com comportamento de solos finos.

Figura 13 – Camadas compressível consideradas no CPTU 03 da obra C



Fonte: Adaptado de Geoforma Engenharia Ltda (2022).

O Anexo A deste trabalho apresenta os resultados dos perfis de CPTU, elencando as camadas consideradas, a profundidade da amostra retirada e o ponto definido para analisar as tensões de cada amostra no cálculo do recalque por consolidação, e o Anexo B demonstra as curvas de adensamento obtidas para cada amostra adensada.

4. METODOLOGIA

A primeira análise proposta por este trabalho foi comparar o número de módulo de compressão (m) e recompressão (mr) extraídos dos ensaios de adensamento e CPTU, em argilas e siltes, com os valores fornecidos na literatura (Tabela 2). Para isto, estabeleceu-se os parâmetros de coeficiente de compressão (Cc), recompressão (Cr) e índice de vazios (e_0) de cada amostra adensada, seguindo os procedimentos explicados no item 2.3 deste trabalho. Para a obtenção de ml e $mr1$, parâmetros denominados para a correlação com o adensamento, aplicou-se a Equação 12.

Para obter o número de módulo pelo ensaio de piezocone, com a Equação 15, definiu-se condições de contorno para a adoção do coeficiente modificador (a) nos materiais analisados, sendo assim, os critérios seguem demonstrados na Tabela 4. Conforme apresentado por Fellenius (2006) na Tabela 3, o coeficiente (a) é considerado igual a 3 em argilas lacustres e marinhas normalmente consolidadas moles e igual a 5 para argilas duras, podendo estes valores variarem em duas unidades para diferentes materiais. Visto que argilas pré-adensadas apresentam uma menor deformabilidade em carregamentos menores, determinou-se que o coeficiente seria igual a 7 e em turfas e argilas orgânicas igual a 3. Aos siltes, por apresentarem um melhor comportamento quando comparados a argilas, aplicou-se o valor de 12.

Das 25 amostras estudadas, em 12 aplicou-se o valor igual a 7, como argilas pré adensadas, 8 classificaram-se como turfas ou argilas orgânicas, 4 como siltes e 1 como argila normalmente adensada, prevalecendo-se materiais com baixas resistências e de baixa qualidade.

Tabela 4 – Critérios para adoção do coeficiente modificador (a)

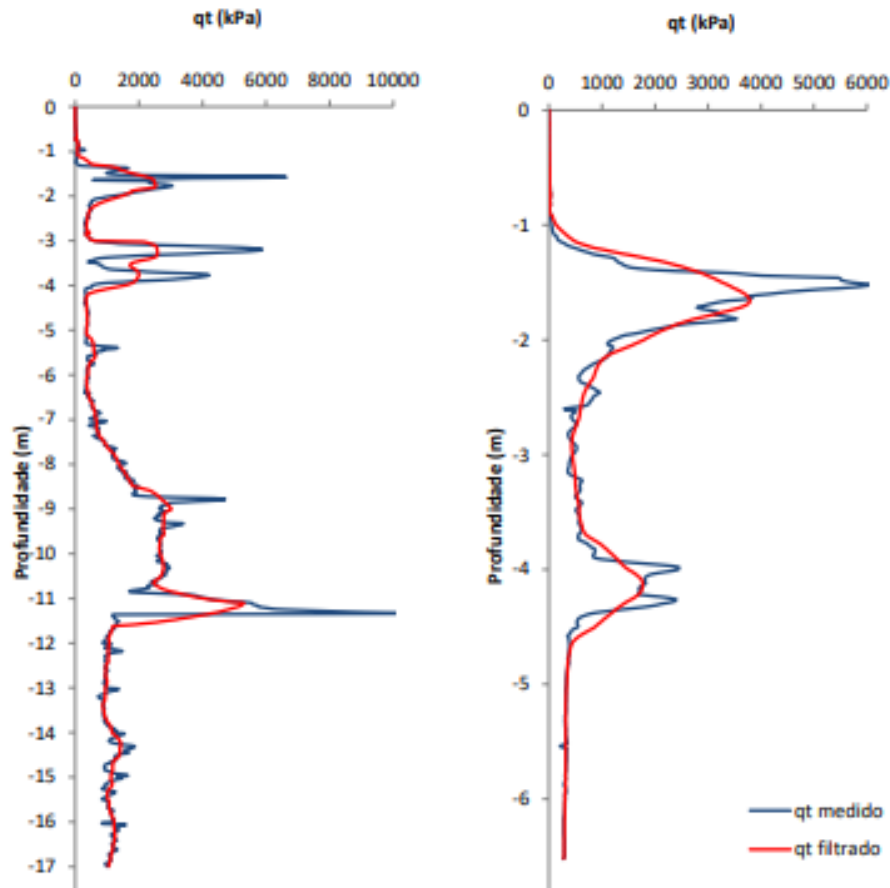
Tipo de solo	a
Turfas e argilas orgânicas	3
Argilas normalmente adensadas	5
Argilas pré adensadas	7
Siltes	12

Fonte: autoria própria (2022).

Apesar do ensaio de CPTU registrar a resistência de ponta (qc), as análises são feitas com a resistência de ponta corrigida (qt), resultado da Equação 6. Porém, para a aplicação do método de Janbu, Fellenius (2006) sugere que se realize uma filtragem dos resultados do ensaio,

considerando-se ao longo de cada 50 cm do perfil, uma média aritmética dos valores de qt medidos. Esta filtragem deve ser realizada a fim de amenizar possíveis picos de resistência, típicas da presença de lentes de areia entremeadas nas camadas de materiais finos, suavizando e homogeneizando o gráfico de resistência de ponta, conforme demonstra a Figura 14.

Figura 14 – Exemplos de resistências de ponta corrigidas e filtradas



Fonte: autoria própria (2022).

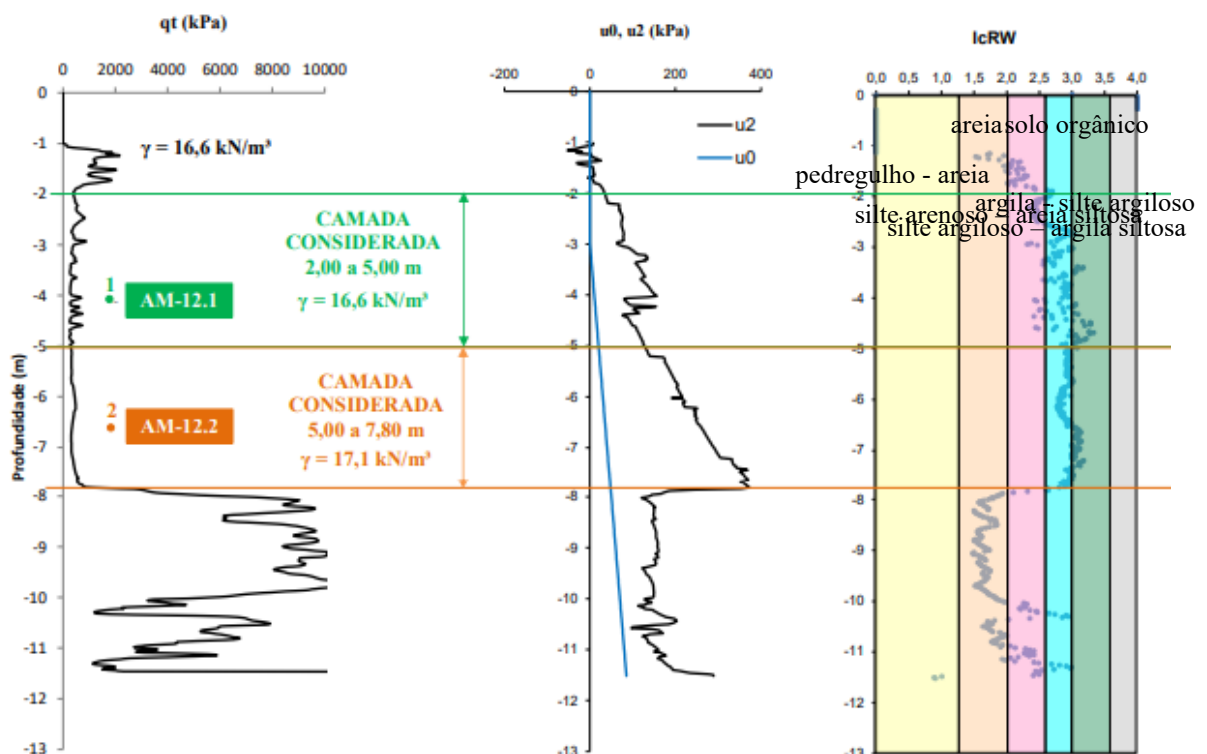
O último termo do equacionamento para determinação do número de módulo no ensaio é a tensão efetiva vertical em cada ponto, que é calculada pela multiplicação do peso específico do material pela profundidade até o ponto de estudo, descontando-se a pressão hidrostática existente. Como todas as amostras eram compostas por materiais finos, adotou-se o fator mr/m de 5, valor mais conservador apresentado pela literatura, resultando assim, num número de módulo de recompressão (mr) cinco vezes superior ao número de módulo (m).

A fim de realizar a comparação principal proposta neste trabalho, o cálculo de deformações verticais pelos dois ensaios apresentados, deve-se obter ainda um parâmetro imprescindível para os cálculos, que é a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}). Para tanto, adotou-

se o método de Pacheco Silva, descrito no item 2.3 do trabalho, para determinar σ'_{vm} nas amostras proveniente do ensaio de adensamento. Para as verticais de CPTU, aplicou-se a Equação 11, disposta no capítulo 2.4, com o coeficiente de pré-adensamento, $K1$, adotado como sendo igual a 0,263 para as 21 amostras de Santa Catarina e igual a 0,222 para as 4 amostras de Pernambuco, conforme estudos de casos fornecidos pela literatura.

Para garantir que as premissas adotadas em ambos os métodos fossem as mesmas, estabeleceu-se a tensão efetiva vertical inicial sempre no ponto médio da extração do tubo shelby, cuja amostra foi utilizada no ensaio de adensamento. Outro aspecto que deve ser destacado é que nos casos em que foram retiradas duas amostras por vertical, o peso específico natural considerado na determinação das tensões da segunda amostra foi da superfície até o fim da primeira camada como sendo o peso específico da amostra 1 e do início da segunda camada ao ponto o obtido no ensaio da amostra 2. A Figura 15 exemplifica um caso aplicado ao CPTU-12 da obra E, onde a tensão inicial efetiva foi considerada nos pontos 1 e 2, em cada amostra, para a análise do recalque por adensamento.

Figura 15 – Camadas consideradas na vertical de CPTU-12 da obra E



Fonte: Adaptado de Geoforma Engenharia Ltda (2022).

Com os valores de tensão efetiva vertical e tensão de pré-adensamento, determinou-se a razão de pré-adensamento (*OCR*) dos solos e classificou-se pelo seu histórico de tensões como normalmente adensado ou pré adensados.

Em cada camada considerada, realizou-se o cálculo de recalque com 16 diferentes situações, sendo quatro carregamentos (25, 50, 100 e 150 kPa) pelo método de adensamento tradicional ($\rho4$), pelo método de Janbu com o *m* correlacionado pelo adensamento ($\rho1$), pelo método de Janbu com os valores de *m* calculados no CPTU ($\rho2$) e pelo método de Janbu com valores de *m* estabelecidos pela literatura ($\rho3$). Fellenius (2006) elencada na Tabela 2, valores típicos para diferentes materiais, determinando o número de módulo (*m*) de 5 a 20 para argilas siltosas moles a rijas, siltes moles a rijos, argilas e argilas orgânicas, e de 1 a 5 para turfas. Adotando um valor aproximadamente médio para estes solos, estabeleceu-se os critérios para adoção do *m* no cálculo de recalques em $\rho3$, apresentados na Tabela 5.

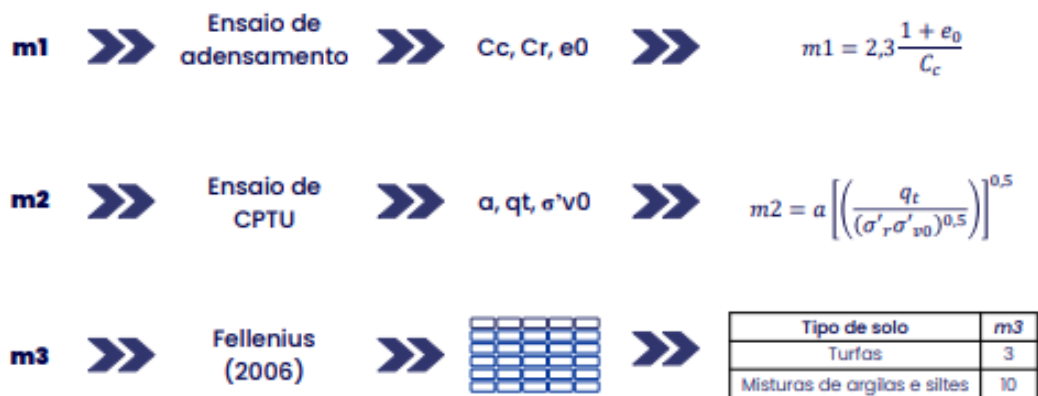
Das 25 amostras ensaiadas, apenas três classificaram-se como turfas com *m* igual a 3, sendo as demais igual a 10. As lentes de areias presentes também foram consideradas, sendo adotado o valor de 400 para o *m* nas microcamadas com *IcRW* menores que 2,2, visto que Fellenius (2006) propõe o número de módulo típico de 250 a 400 em areias densas. A Figura 15 demonstra esquematicamente como foram obtidos os números de módulo, *m1*, *m2* e *m3*.

Tabela 5 – Critérios para adoção de *m3* da literatura

Tipo de solo	<i>m3</i> adotado
Turfas	3
Misturas de argilas e siltes	10

Fonte: autoria própria (2022).

Figura 16 – Esquema para determinar os valores de *m*



Fonte: autoria própria (2022).

O recalque pelo método convencional de adensamento primário (ρ_4) deve ser calculado pela aplicação das Equações 1 a 3, verificando para cada carregamento se as deformações verticais estão no trecho de recompressão e/ou no trecho de reta livre. Considerou-se para o cálculo aspectos como a espessura da camada (H), o índice de vazios inicial (e_0), o coeficiente de recompressão (Cr), o coeficiente de compressão (Cc), a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) e as tensões efetivas verticais iniciais (σ'_{v0}) e finais (σ'_{v1}) no ponto médio da camada em que a amostra foi coletada.

Com o m derivado dos parâmetros do ensaio de adensamento (m_1), efetuou-se o cálculo do recalque para os mesmos carregamentos pelo método de Janbu, com a multiplicação da deformação, obtida nas Equações 16 a 18, pela espessura da camada (H), denominando de ρ_1 . Para as deformações elásticas, o número de módulo de recompressão (mr) foi obtido aplicando a expressão 12, porém substituindo Cc por Cr , o que permitiu uma comparação do fator mr/m com o valor proposto pela literatura de, 5 a 12 para argilas e siltes. A Figura 17 demonstra um sequenciamento na metodologia adotada para obtenção de ρ_1 .

Figura 17 – Metodologia para cálculo de ρ_1 .



Fonte: autoria própria (2022).

O método de Janbu pode também ser usado para estimar recalques em ensaios de CPTU, onde para cada leitura, de 2 em 2 cm, determina-se a deformação de cada microcamada, para, por fim, realiza-se o somatório na camada considerada, para obter o recalque total. Analisa-se, para cada leitura, em uma planilha, as tensões efetivas atuantes, a classificação ICRW (para detectar trechos com materiais grosseiros), número de módulo de compressão e recompressão, para assim, determinar a deformação desta microcamada.

Ao verificar se as tensões atuantes estão no trecho elástico e/ou plástico, aplica-se das Equações 16 a 18, para determinar a microdeformação. As estimativas de recalques ρ_2 foram obtidas com o somatório das deformações por microcamada, para os quatro carregamentos, considerando o valor de m calculado ao longo de todas as leituras de piezocone, conforme

ilustrado na Figura 18. O recalque ρ_3 seguiu o mesmo procedimento apresentado em ρ_2 , porém considerando o m_3 adotado pelos critérios da Tabela 5.

Figura 18 – Esquema metodológico para obtenção de ρ_2



Fonte: autoria própria (2022).

Com a aplicação destes diferentes métodos e considerações, realizou-se um comparativo entre as magnitudes e parâmetros obtidos, verificando se a aplicabilidade do método de Janbu e apresentando as diferenças na determinação de recalques pelo ensaio de adensamento e pelo ensaio de piezocone.

5. ANÁLISES E RESULTADOS

O capítulo de resultados tem como objetivo apresentar os parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento de cada amostra, comparar os números de módulo (m) do trecho de reta livre calculados pelos diferentes métodos adotados com a literatura e avaliar as estimativas de recalques estabelecidas na aplicação do método convencional por adensamento com as determinadas no método de Janbu pela correlação do adensamento e pelos ensaios de CPTU.

5.1. NÚMERO DE MÓDULO (m)

Um dos principais motivos de realizar o ensaio de adensamento é verificar seu comportamento e definir uma tendência de deformações no solo quando carregado. O índice de vazios (e_0), o coeficiente de compressibilidade (C_c) e o coeficiente de recompressão (C_r) são os parâmetros que permitem avaliar a magnitude da deformação da camada de solo analisada pelo ensaio edométrico. Para isto, determinou-se estes parâmetros para cada amostra coletada, a partir das curvas de adensamento dispostas no Anexo B, e correlacionou-os com os parâmetros m_1 e mr_1 do método de Janbu, apresentando os resultados expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento

Obra	Amostra	G	W_n	e_0	C_c	C_r	I_{crw}	m_1	mr_1	mr_1/m_1
A	AM-01	2,453	59,1	1,59	0,29	0,09	2,29	20,54	66,19	3,22
	AM-05	2,549	39,0	0,96	0,33	0,08	2,29	13,66	56,35	4,13
	AM-06	2,111	213,1	4,48	1,81	0,58	2,66	6,96	21,73	3,12
	AM-07	2,411	125,1	3,07	1,12	0,36	2,53	8,36	26,00	3,11
	AM-08	2,668	31,8	0,86	0,2	0,06	2,49	21,39	71,30	3,33
B	AM-01	2,235	72,9	1,62	0,69	0,11	2,63	8,73	54,78	6,27
	AM-02	2,642	49,1	1,34	0,47	0,09	3,46	11,45	59,80	5,22
	AM-04	2,619	48,4	1,30	0,38	0,06	2,99	13,92	88,17	6,33
C	AM-01	2,558	98,5	2,62	1,14	0,28	3,08	7,30	29,74	4,07
	AM-03.1	2,649	68,4	1,91	0,66	0,10	2,73	10,14	66,93	6,60
	AM-03.2	2,564	93,4	2,49	1,1	0,20	3,11	7,30	40,14	5,50
	AM-04.1	2,708	66,1	1,87	0,64	0,11	2,90	10,31	60,01	5,82
	AM-04.2	2,646	59,6	1,62	0,62	0,13	2,94	9,72	46,35	4,77

Obra	Amostra	G	W_n	e_0	C_c	C_r	I_{crw}	m_l	mr_l	mr_l/m_l
D	AM-01	2,707	38,4	1,19	0,28	0,05	2,86	17,99	100,74	5,60
	AM-06	2,689	58,7	1,63	0,24	0,05	2,65	25,20	120,98	4,80
E	AM-10	2,646	83,4	2,31	1,52	0,16	2,68	5,01	47,58	9,50
	AM-11	2,683	40,3	1,17	0,27	0,05	2,90	18,49	99,82	5,40
	AM-12.1	2,651	76,0	1,81	0,63	0,10	2,78	10,26	64,63	6,30
	AM-12.2	2,696	50,9	1,38	0,47	0,07	3,01	11,65	78,20	6,71
	AM-18	2,674	44,9	1,33	0,38	0,10	3,30	14,10	53,59	3,80
	AM-19	2,675	70,8	1,93	0,84	0,10	2,53	8,02	67,39	8,40
	AM-10.1	2,444	150,7	3,76	1,47	0,35	3,20	7,45	31,28	4,20
F	AM-10.2	2,625	94,8	2,49	1,10	0,17	3,29	7,30	47,22	6,47
	AM-32.1	2,155	207,9	5,03	2,74	0,33	2,59	5,06	42,03	8,30
	AM-32.2	2,639	87,9	2,27	0,94	0,15	2,64	8,00	50,14	6,27

Fonte: autoria própria (2022).

Segundo Fellenius (2006), o fator mr/m em siltes e argilas geralmente apresenta-se entre 5 e 12, o que se pode verificar em 15 das amostras estudadas. Nas 10 amostras em que esta afirmação não se confirmou, este fator apresentou valores inferiores, em média de 3,8, mostrando que o trecho de recompressão pode apresentar uma deformação elástica menor do que a estimada do que quando o fator é adotado pela indicação da literatura.

Para as verticais de CPTU, como os dados obtidos são a cada 2 cm de profundidade, a tensão vertical efetiva (σ'_{v0}) e os números de módulo de compressão (m_2) foram estabelecidos para cada leitura ao longo do ensaio. A fins de comparação, realizou-se uma média entre os valores de m_2 obtidos na camada em que foi coletada a amostra de adensamento.

Ao comparar o número de módulo obtido no adensamento e no CPTU, pode-se verificar que 18 amostras sofreram um aumento no CPTU, demonstrando que o m no ensaio de piezocone leva em consideração a não homogeneidade do solo, como a presença de lentes de areia, mica ou conchas marinhas e, como consequência, apresentando um valor maior de número de módulo. No Quadro 6, pode-se verificar m_l , m_2 e a variação percentual comparativa que aconteceu do valor obtido no adensamento para o do CPTU, com a descrição da amostra analisada, onde apenas 10 amostras obtiveram variações menores que 15% e cerca de 13 com variações superiores a 50%.

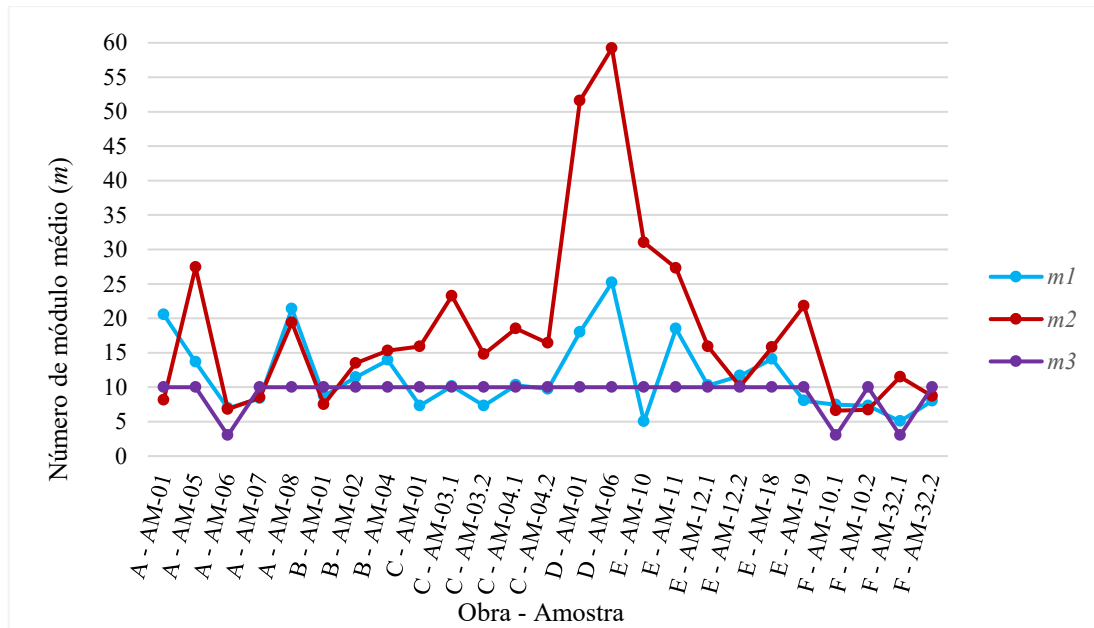
Quadro 6 – Comparativo de *m1* e *m2* por amostras

Obra	Amostra	Classificação tátil-visual da amostra	<i>m1</i>	<i>m2</i>	$\Delta\%$
A	AM-01	Argila orgânica pouco arenosa preta	20,54	8,13	-60%
	AM-05	Argila arenosa cinza escura (presença de matéria orgânica)	13,66	27,4	101%
	AM-06	Argila orgânica preta (turfa)	6,96	6,8	-2%
	AM-07	Argila orgânica cinza escura	8,36	8,5	2%
	AM-08	Argila arenosa cinza clara (presença de matéria orgânica)	21,39	19,4	-9%
B	AM-01	Argila orgânica variegada (preta)	8,73	7,5	-14%
	AM-02	Argila arenosa cinza clara (presença de matéria orgânica)	11,45	13,5	18%
	AM-04	Argila pouco arenosa variegada (cinza clara) (presença de matéria orgânica)	13,92	15,3	10%
C	AM-01	Argila cinza escura (presença de matéria orgânica)	7,30	15,9	118%
	AM-03.1	Argila variegada (cinza escura) com mica (presença de matéria orgânica)	10,14	23,25	129%
	AM-03.2	Argila cinza escura com mica (presença de matéria orgânica)	7,30	14,8	103%
	AM-04.1	Argila variegada (amarela) com mica (presença de matéria orgânica)	10,31	18,5	79%
	AM-04.2	Argila arenosa cinza escura (lentes arenosas)	9,72	16,4	69%
D	AM-01	Silte arenoso variegado (amarelo) com mica (presença de caulinita)	17,99	51,6	187%
	AM-06	Silte arenoso variegado (amarelo) (presença de caulinita)	25,20	59,22	135%
E	AM-10	Silte argiloso cinza escuro com mica (presença de conchas marinhas)	5,01	31	519%
	AM-11	Silte argiloso cinza escuro com mica	18,49	27,3	48%
	AM-12.1	Argila arenosa cinza escura com mica (presença de conchas marinhas)	10,26	15,9	55%
	AM-12.2	Argila arenosa cinza escura (presença de conchas marinhas)	11,65	10,1	-13%
	AM-18	Argila arenosa cinza escura (presença de conchas marinhas)	14,10	15,8	12%
	AM-19	Argila arenosa cinza escura (presença de conchas marinhas)	8,02	21,8	172%
F	AM-10.1	Argila orgânica marrom escura (presença de conchas marinhas) (Turfa)	7,45	6,6	-11%
	AM-10.2	Argila orgânica cinza escura	7,30	6,7	-8%
	AM-32.1	Argila orgânica marrom escura (Turfa)	5,06	11,5	127%
	AM-32.2	Argila orgânica cinza escura	8,00	8,7	9%

Fonte: autoria própria (2022).

Ao plotar o Figura 19, pode-se perceber que os picos, onde as maiores diferenças ocorreram, foram nas amostras com materiais mais grosseiros, coletadas da obra D e que se classificam como siltes arenosos, estando de acordo com a variação de 40 a 60 proposta por Fellenius (2006) para estes solos.

Figura 19 – Comparativo de $m1$, $m2$ e $m3$ por amostras



Fonte: autoria própria (2022).

Seguindo os critérios de tipo de solo na adoção o coeficiente modificador (a), determinou-se um valor de m médio para a análise por correlação do adensamento e pelo CPTU, visto que esta definição interfere diretamente no número de módulo (m) calculado. Comparando $m1$ das amostras individuais com esta média, notou-se que alguns materiais apresentaram comportamentos distintos, assim, retirou-se a amostra de maior e menor valor, recalculou-se a média e concluiu-se que m pode apresentar um desvio de cerca de duas unidades. A Tabela 7 demonstra as médias obtidas para os diferentes tipos de materiais, considerando todas as amostras do trabalho.

Os números apresentados como típicos da literatura, dispostos na Tabela 2, em geral, estão de acordo com os resultados encontrados nas amostras analisadas. Os três materiais classificados como turfas não apresentaram o intervalo pertinente da literatura de 1 a 5, e dos demais materiais, 19 amostras obtidas na correlação com o adensamento e 15 amostras do CPTU, apresentaram valores no intervalo de 5-20. Os solos que ficaram fora do intervalo citado, tiveram resultados superiores, significando que em alguns casos, o material possui um

comportamento melhor do que o esperado, com valores de número de módulo conservadores na literatura.

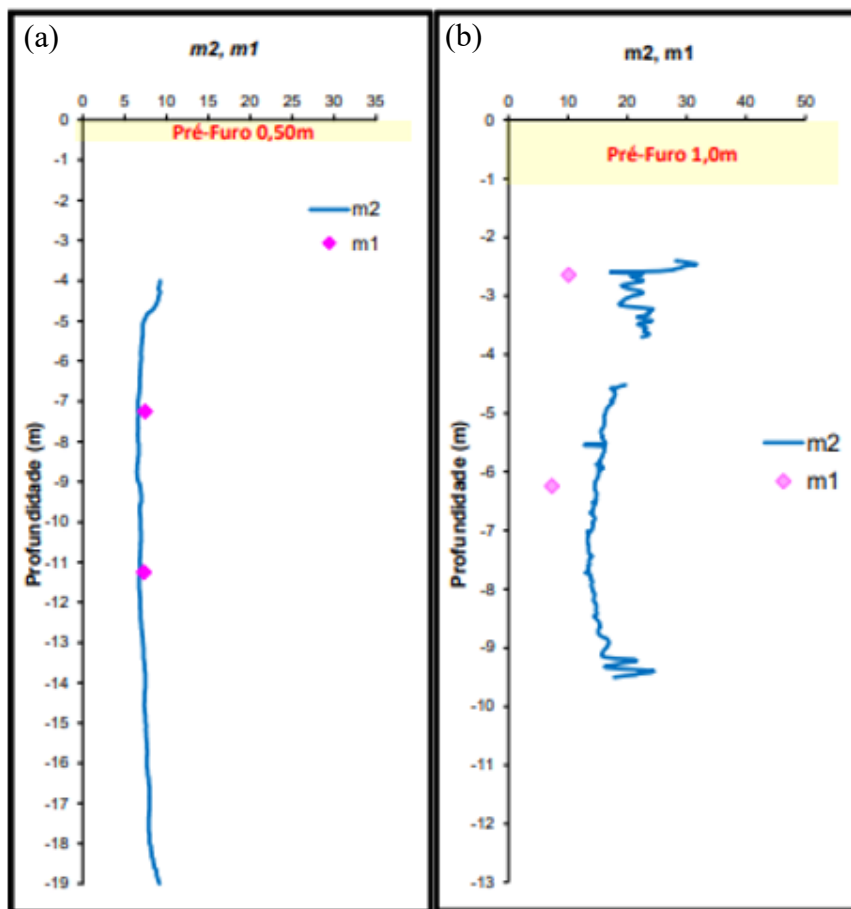
Tabela 7 – Valor médio de $m1$ e $m2$ por tipo de solo

Tipo de solo	a	$m1$ médio	$m2$ médio
Turfas e argilas orgânicas	3	9,05	8,05
Argilas normalmente adensadas	5	11,65	10,10
Argilas pré adensadas	7	11,47	18,16
Siltes	12	16,67	42,28

Fonte: autoria própria (2022).

Para demonstrar claramente a diferença entre os valores de m estabelecidos, plotou-se uma curva com os números de módulo ao longo de dois perfis de CPTU nas camadas analisadas, conforme Figura 20.

Figura 20 – Parâmetro $m1$ e $m2$ para o CPTU-10 da obra F e CPTU-03 da obra C



Fonte: autoria própria (2022).

A Figura 20(a) é um exemplo da vertical de CPTU-10 da obra F, onde foram coletas duas amostras para o ensaio de adensamento e que apresentaram valores muito aproximados de m por CPTU e pela correlação de adensamento nos dois pontos médios da coleta. Na Figura 20(b), exibiu-se o perfil de CPTU-03 da obra C, onde, o $m1$ e $m2$ das amostras apresentaram uma diferença significativa, com aumento de cerca de 100%, porém, ainda, com valores aceitáveis pela literatura.

5.2. ANÁLISE DE RECALQUES

A fim de determinar a magnitude das deformações verticais sofridas por uma camada de solo, estudou-se o estado de tensões presentes no ponto médio da amostra coletada. Seguindo o critério de simplificação estabelecido de que o solo sobreposto ao ponto é homogêneo e com o peso específico da amostra na camada, determinou-se a tensão efetiva vertical inicial de cada. A tensão de pré-adensamento foi definida com a aplicação do método de Pacheco Silva, de forma que apenas três classificaram-se como normalmente adensadas, com OCR igual a 1. O Quadro 7 apresenta uma síntese das tensões considerados e histórico de tensões para cada amostra do adensamento.

Quadro 7 – Tensões e histórico de tensões por amostra de adensamento

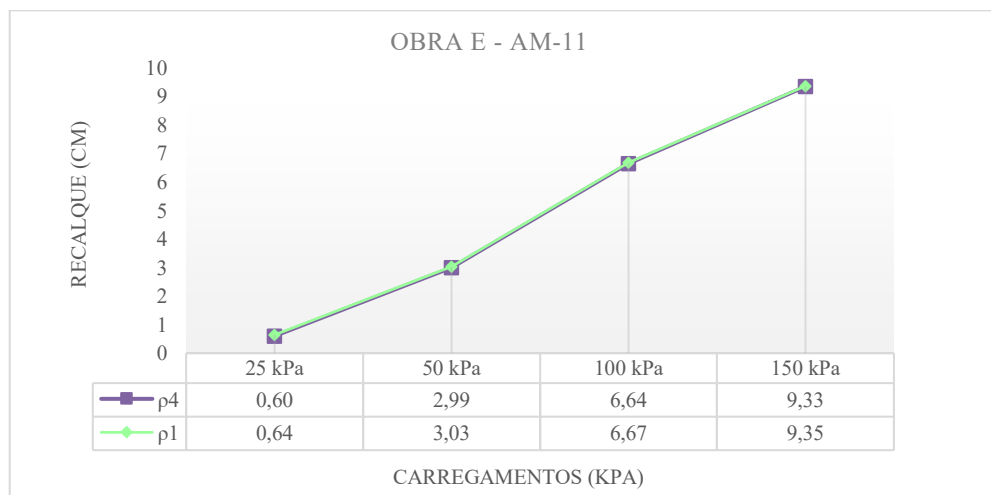
Obra	Amostra	σ'_{v0}	σ'_{vm}	OCR	Histórico de tensões
A	AM-01	17,18	90	5,24	Pré adensada
	AM-05	10,1	72	7,13	Pré adensada
	AM-06	10,63	21	1,98	Pré adensada
	AM-07	22,89	33	1,44	Pré adensada
	AM-08	16,57	60	3,62	Pré adensada
B	AM-01	46,76	80	1,71	Pré adensada
	AM-02	51,77	86	1,66	Pré adensada
	AM-04	52,46	107	2,04	Pré adensada
C	AM-01	35,26	41	1,16	Pré adensada
	AM-03.1	23,31	58	2,49	Pré adensada
	AM-03.2	41,85	58	1,39	Pré adensada
	AM-04.1	30,39	56	1,84	Pré adensada
	AM-04.2	43,67	54	1,24	Pré adensada
D	AM-01	36,3	125	3,44	Pré adensada
	AM-06	16,74	115	6,87	Pré adensada

Obra	Amostra	$\sigma'v\theta$	$\sigma'vm$	OCR	Histórico de tensões
E	AM-10.1	45,18	84	1,86	Pré adensada
	AM-11.1	67,23	93	1,38	Pré adensada
	AM-12.1	57,06	75	1,31	Pré adensada
	AM-12.2	74,37	65	1,00	Normalmente adensada
	AM-18.1	52,19	79	1,51	Pré adensada
	AM-19.1	55,2	120	2,17	Pré adensada
F	AM-10.1	21,03	21	1,00	Normalmente adensada
	AM-10.2	34,9	28	1,00	Normalmente adensada
	AM-32.1	7,25	38	5,24	Pré adensada
	AM-32.2	17,6	40	2,27	Pré adensada

Fonte: autoria própria (2022).

Para cada amostra, determinou-se os acréscimos de tensões de 25, 50, 100 e 150 kPa nas tensões efetivas iniciais e calculou-se uma estimativa dos recalques nas camadas estabelecidas pelo método convencional de adensamento ($\rho4$), com os parâmetros $e\theta$, Cc e Cr . Em seguida, com os valores de mI e mrI decorridos da correlação do adensamento, disposto na Tabela 6, estimou-se a magnitude dos recalques para o método de Janbu ($\rho1$). O resultado destas deformações pode ser verificado Tabela 8 e na Figura 21, que demonstra graficamente a diferença entre os dois métodos adotados, como exemplo, de uma amostra. Salienta-se, ainda, que para todas as amostras $\rho1$ e $\rho4$ tiveram diferenças milimétricas, sendo adotado como padrão, para a continuidade das comparações dos métodos, apenas um dos casos.

Figura 21 – Recalques $\rho1$ e $\rho4$ para a camada de 4,1 m a 6,0 m da AM-11 da obra E



Fonte: autoria própria (2022).

Tabela 8 – Recalques por adensamento ρ_4 para os diferentes carregamentos

Obra - Amostra	Espessura da camada (cm)	Recalques por adensamento em cm (ρ_4)			
		25 kPa	50 kPa	100 kPa	150 kPa
A - AM-01	60	0,81	1,23	2,27	3,31
A - AM-05	50	1,10	1,58	3,29	4,66
A - AM-06	130	13,93	23,84	35,05	42,01
A - AM-07	60	8,20	15,23	23,97	29,68
A - AM-08	60	0,77	1,37	2,94	3,94
B - AM-01	220	1,72	6,94	17,42	24,80
B - AM-02	300	1,97	6,95	17,41	24,86
B - AM-04	130	0,57	0,99	4,35	7,00
C - AM-01	190	10,97	19,99	31,98	40,15
C - AM-03.1	130	1,41	4,77	11,43	15,79
C - AM-03.2	500	13,78	35,52	65,27	85,94
C - AM-04.1	60	0,60	2,71	5,52	7,41
C - AM-04.2	120	3,51	7,34	12,62	16,30
D - AM-01	1692	8,79	14,53	28,88	58,23
D - AM-06	1000	7,24	10,96	15,87	30,00
E - AM-10	600	5,55	22,76	73,28	108,70
E - AM-11	190	0,60	2,99	6,64	9,33
E - AM-12.1	300	3,90	11,66	22,86	30,93
E - AM-12.2	280	7,46	13,23	21,92	28,41
E - AM-18	280	2,04	7,27	15,17	20,80
E - AM-19	280	1,55	2,68	12,19	21,93
F - AM-10.1	600	63,04	97,95	140,83	168,66
F - AM-10.2	900	66,55	109,52	166,57	205,41
F - AM-32.1	500	17,74	60,13	122,06	159,82
F - AM-32.2	600	14,53	49,12	90,59	117,13

Fonte: autoria própria (2022).

A partir da aplicação do método de Janbu em ensaios de CPTU, estimou-se os recalques com os valores de m calculados (ρ_2) e os adotados da literatura (ρ_3), com resultados dispostos na Tabela 9. Ao avaliar as magnitudes de deformações calculadas, observou-se que os recalques ρ_2 apresentaram, de forma geral, valores ligeiramente inferiores, para camadas menos espessas e em solos menos homogêneos, aos recalques ρ_3 .

Explica-se pelo fato da presença de lentes de areia, conchas marinhas e mica serem detectadas nas microcamadas e na resistência de ponta do ensaio de piezocone. Outro fator que interfere diretamente nas magnitudes dos recalques de ρ_2 , foi o critério de adoção do coeficiente

modificador (a), pois quanto maior os valores de a adotado, maior será m , que é inversamente proporcional aos recalques. A grande maioria dos casos analisados apresentou uma média do número de módulo (m) superior quando calculado pelas camadas de CPTU com m calculado do que por CPTU com m adotado e por adensamento, gerando magnitudes de deformações verticais menores.

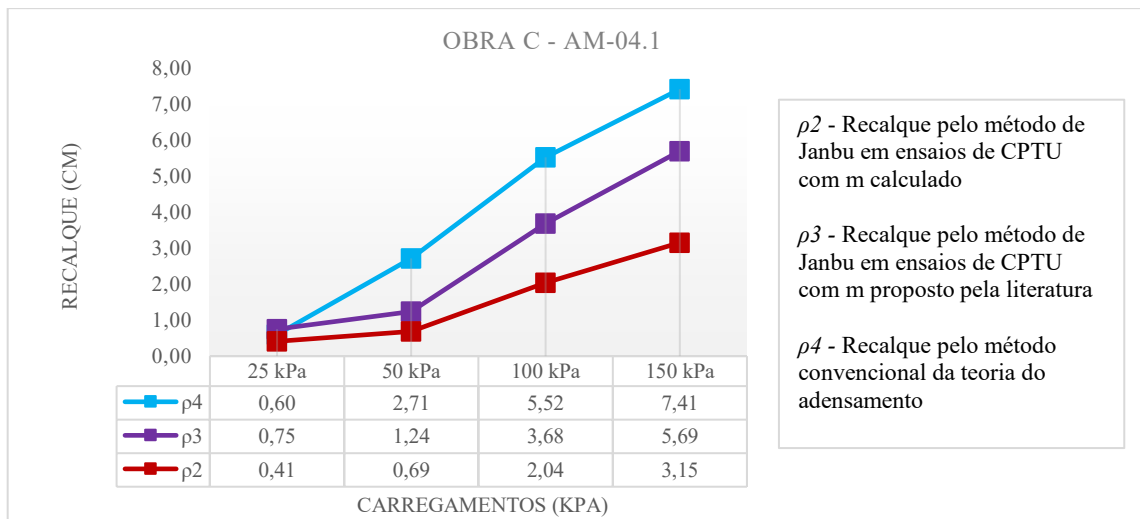
Tabela 9 – Recalques pelo método Janbu ρ_2 e ρ_3 para os diferentes carregamentos

Obra / Amostra	Recalques por Janbu com m calculado em cm (ρ_2)				Recalques por Janbu com m adotado em cm (ρ_3)			
	25 kPa	50 kPa	100 kPa	150 kPa	25 kPa	50 kPa	100 kPa	150 kPa
A/AM-01	1,36	2,18	5,85	8,53	1,04	1,68	4,52	6,59
A/AM-05	0,50	0,72	1,27	1,85	0,79	1,13	1,96	2,91
A/AM-06	4,94	11,62	22,41	29,27	11,77	26,88	52,64	69,13
A/AM-07	2,37	3,73	10,01	15,48	2,01	3,17	8,38	12,96
A/AM-08	0,65	1,58	3,30	4,45	1,07	2,54	5,35	7,26
B/AM-01	2,86	5,96	18,56	27,69	2,10	4,35	13,56	20,27
B/AM-02	5,13	10,75	19,08	25,07	7,05	14,97	26,81	35,41
B/AM-04	0,79	2,48	5,52	7,85	1,26	3,88	8,69	12,44
C/AM-01	1,33	4,55	9,48	13,04	2,21	7,43	15,46	21,38
C/AM-03.1	0,81	1,28	2,15	3,76	1,83	2,90	4,82	8,40
C/AM-03.2	9,03	17,93	31,26	40,77	13,33	26,76	47,18	61,85
C/AM-04.1	0,41	0,69	2,04	3,15	0,75	1,24	3,68	5,69
C/AM-04.2	0,64	2,12	4,86	6,84	1,12	3,58	8,15	11,47
D/AM-01	2,05	3,54	5,73	7,35	10,80	18,66	30,16	38,64
D/AM-06	2,08	3,29	4,86	5,92	11,82	18,91	28,18	34,47
E/AM-10	1,59	3,97	10,65	16,28	4,85	11,83	31,90	49,02
E/AM-11	0,90	2,37	4,77	6,56	2,42	6,38	12,94	17,82
E/AM-12.1	2,31	5,58	11,59	16,72	3,69	8,83	18,48	27,06
E/AM-12.2	6,08	11,59	19,99	26,36	6,41	12,60	21,72	28,11
E/AM-18	2,05	5,19	10,84	15,44	3,27	8,25	17,38	25,04
E/AM-19	0,95	1,67	4,16	7,36	1,94	3,39	8,21	12,58
F/AM-10.1	32,61	64,95	110,76	141,42	62,26	129,40	232,33	305,61
F/AM-10.2	43,82	78,35	129,19	166,17	32,46	57,57	94,04	120,36
F/AM-32.1	12,35	17,46	35,35	51,47	44,75	64,84	122,41	182,84
F/AM-32.2	9,56	28,38	62,68	86,48	8,36	24,71	54,53	74,70

Fonte: autoria própria (2022).

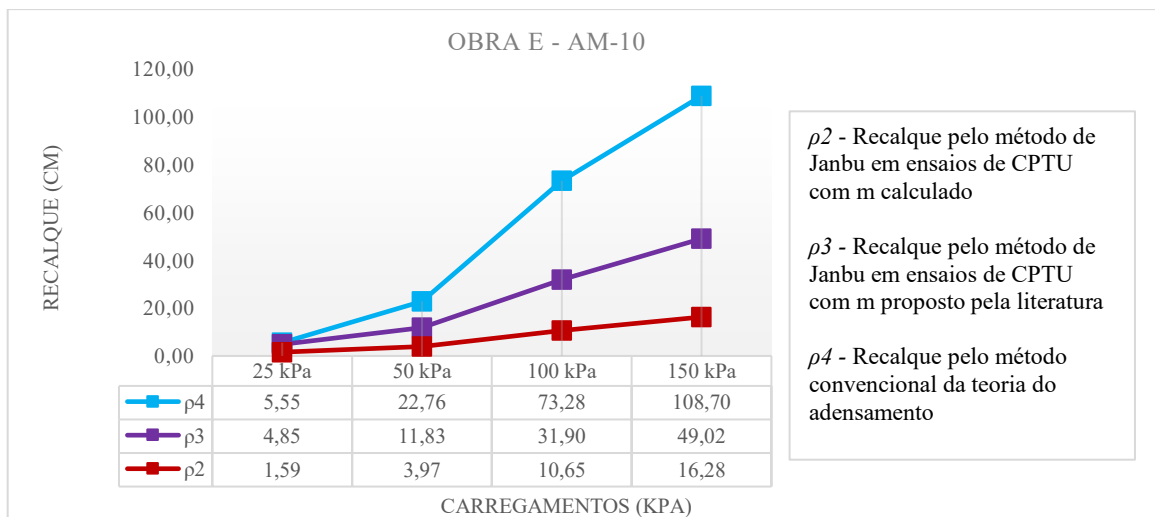
Ao plotar os resultados graficamente das amostras, observou-se a tendência da variação das magnitudes de recalques para maiores carregamentos ser maior. Quando se trata do carregamento de 25 kPa, as deformações apresentaram valores similares, com pouca variação na magnitude, porém para carregamentos mais consideráveis, como de 150 kPa, as variações são mais relevantes. Nas Figuras 22 e 23, explicita-se dois casos com escalas de deformações diferentes, mas que demonstram a mesma tendência na variação ao longo dos carregamentos. Este padrão pode ser percebido ao plotar graficamente e comparar as deformações de todas as amostras para os carregamentos de 25 kPa e de 150 kPa, conforme apresentados nas Figuras 24 e 25.

Figura 22 – Recalques por carregamentos da AM-04.1 da obra C



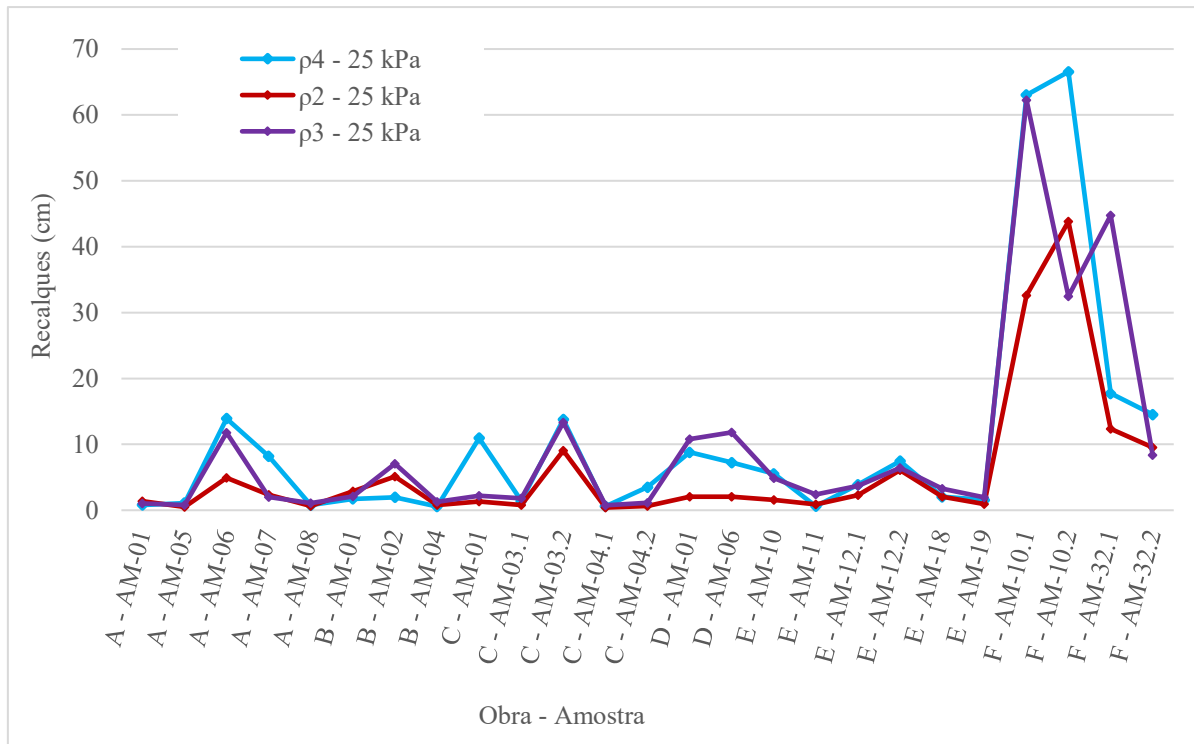
Fonte: autoria própria (2022).

Figura 23 – Recalques por carregamentos da AM-10.1 da obra E



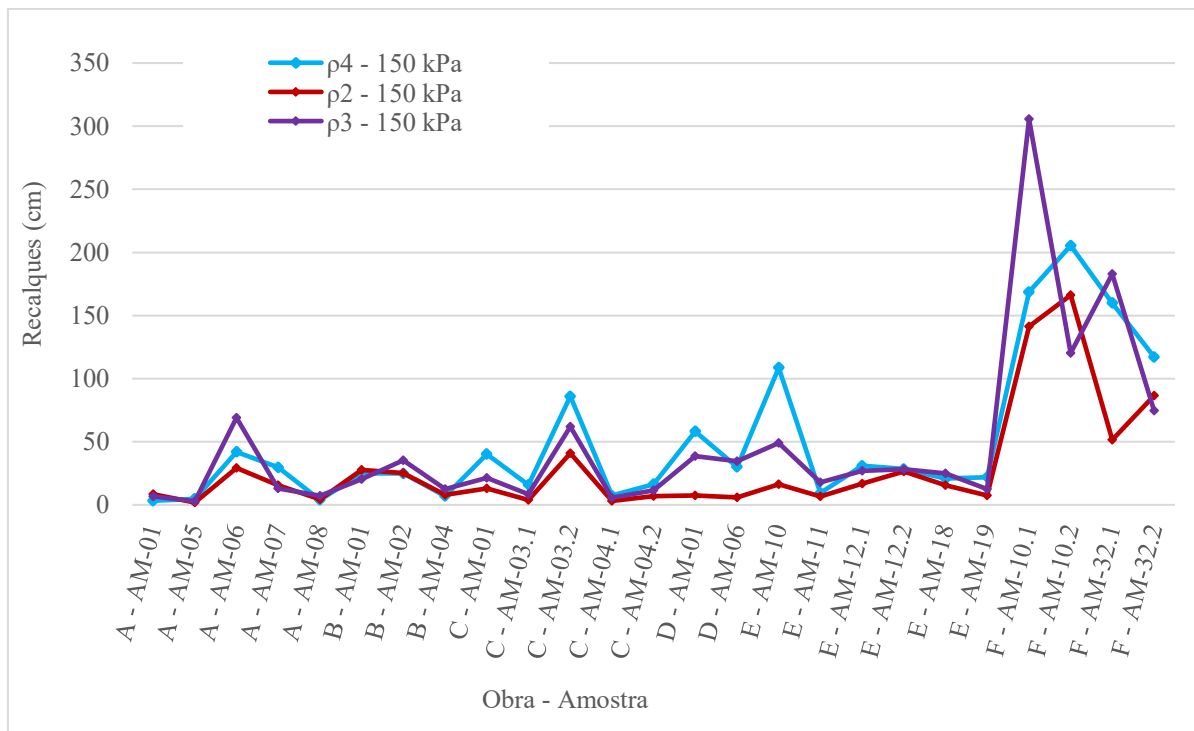
Fonte: autoria própria (2022).

Figura 24 – Recalques para os carregamentos de 25 kPa



Fonte: autoria própria (2022).

Figura 25 – Recalques para os carregamentos de 150 kPa



Fonte: autoria própria (2022).

Para demonstrar mais claramente as diferenças entre os métodos, restringiu-se as análises percentuais para os casos extremos, ao menor carregamento de 25 kPa e ao maior de 150 kPa. Pela Tabela 10, observa-se amostras pontuais com diferenças percentuais elevadas para 25 kPa, justificando-se pela pequena magnitude das deformações, como o caso da AM-04 da obra B, onde variou de 0,57 cm em ρ_4 para 1,26 cm em ρ_3 , com aumento percentual de 121%, porém, a maioria ainda apresentou variações de até 50%. Para o carregamento de 150 kPa, a variação percentual das amostras ficou em média com valores maiores, mas com menos casos pontuais de variação elevadíssimas, acima de 50%.

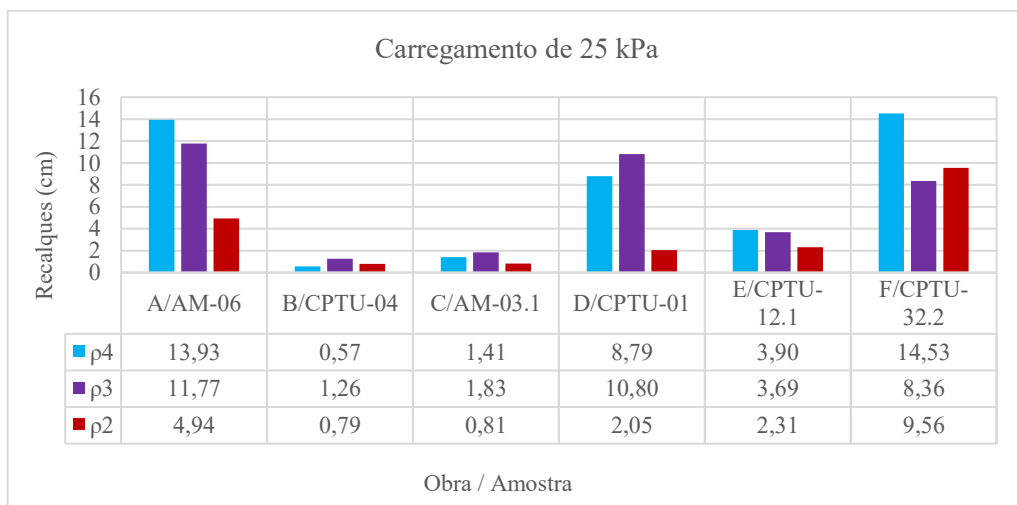
Tabela 10 – Variação percentual dos recalques por adensamento (ρ_4) para os recalques por CPTU (ρ_3) para os carregamentos de 25 kPa e 150 kPa

Obra - Amostra	25 kPa			150 kPa		
	ρ_4 (cm)	ρ_3 (cm)	$\Delta\%$ ρ_4 para ρ_3	ρ_4 (cm)	ρ_3 (cm)	$\Delta\%$ ρ_4 para ρ_3
A - AM-01	0,81	1,04	28%	3,31	6,59	99%
A - AM-05	1,10	0,79	-28%	4,66	2,91	-38%
A - AM-06	13,93	11,77	-16%	42,01	69,13	65%
A - AM-07	8,20	2,01	-75%	29,68	12,96	-56%
A - AM-08	0,77	1,07	39%	3,94	7,26	84%
B - AM-01	1,72	2,10	22%	24,80	20,27	-18%
B - AM-02	1,97	7,05	258%	24,86	35,41	42%
B - AM-04	0,57	1,26	121%	7,00	12,44	78%
C - AM-01	10,97	2,21	-80%	40,15	21,38	-47%
C - AM-03.1	1,41	1,83	30%	15,79	8,40	-47%
C - AM-03.2	13,78	13,33	-3%	85,94	61,85	-28%
C - AM-04.1	0,60	0,75	25%	7,41	5,69	-23%
C - AM-04.2	3,51	1,12	-68%	16,30	11,47	-30%
D - AM-01	8,79	10,80	23%	58,23	38,64	-34%
D - AM-06	7,24	11,82	63%	30,00	34,47	15%
E - AM-10	5,55	4,85	-13%	108,70	49,02	-55%
E - AM-11	0,60	2,42	303%	9,33	17,82	91%
E - AM-12.1	3,90	3,69	-5%	30,93	27,06	-13%
E - AM-12.2	7,46	6,41	-14%	28,41	28,11	-1%
E - AM-18	2,04	3,27	60%	20,80	25,04	20%
E - AM-19	1,55	1,94	25%	21,93	12,58	-43%
F - AM-10.1	63,04	62,26	-1%	168,66	305,61	81%
F - AM-10.2	66,55	32,46	-51%	205,41	120,36	-41%
F - AM-32.1	17,74	44,75	152%	159,82	182,84	14%
F - AM-32.2	14,53	8,36	-42%	117,13	74,70	-36%

Fonte: autoria própria (2022).

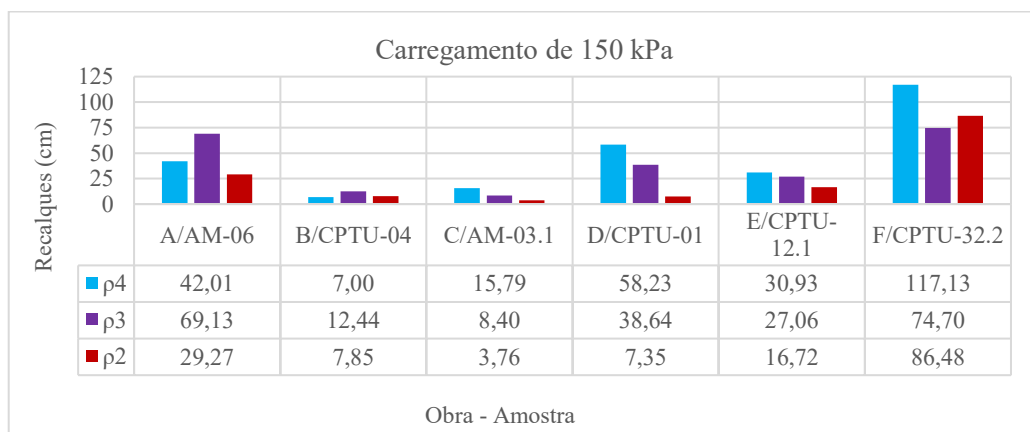
Ainda que existam diferenças nos valores obtidos, pode-se dizer que os métodos apresentam resultados consistentes, sendo o de adensamento mais aproximado ao de Janbu com m adotado, com valores mais conservadores, e o de Janbu por m calculado o com valores menores, conforme apresentado exemplo nas Figuras 26 e 27, de uma amostra para cada obra com os carregamentos de 25 e 150 kPa. Ressalta-se ainda, a importância da verificação por outros fatores que possam interferir nestes resultados e correlacioná-los, como dados de caracterização geotécnica.

Figura 26 – Recalques para o carregamento de 25 kPa



Fonte: autoria própria (2022).

Figura 27 – Recalques para o carregamento de 150 kPa

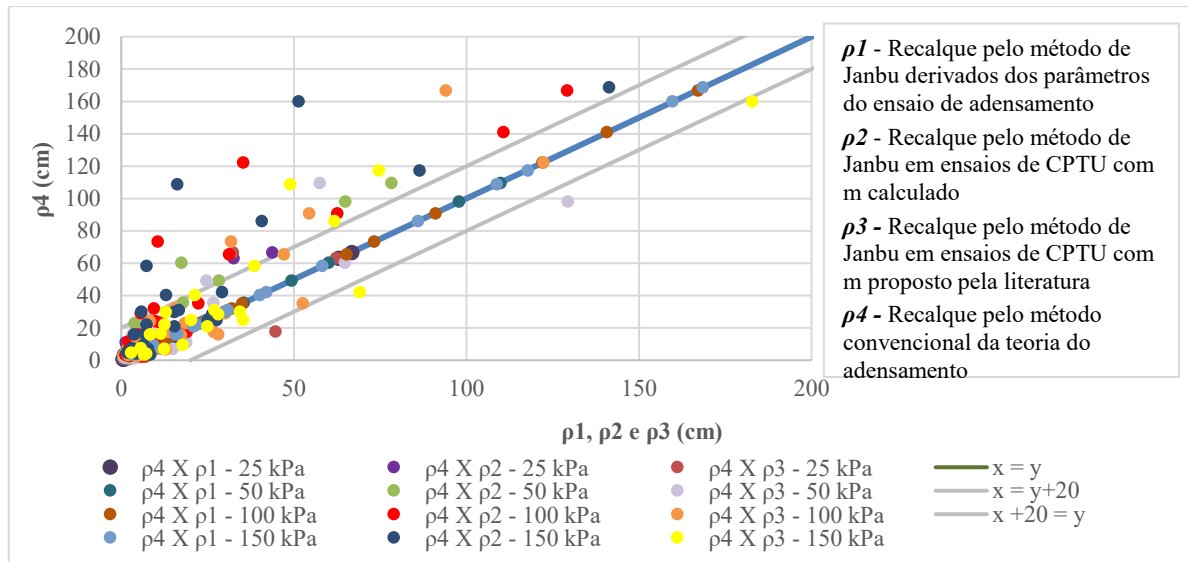


Fonte: autoria própria (2022).

A Figura 28 apresenta os recalques ρ_1 , ρ_2 e ρ_3 sobre o eixo das abscissas com relação a ρ_4 no eixo das ordenadas, demonstrando o quão distantes os pontos estão em relação a linha de 45°, que representa valores de recalque iguais. Pode-se identificar que os pontos plotados de

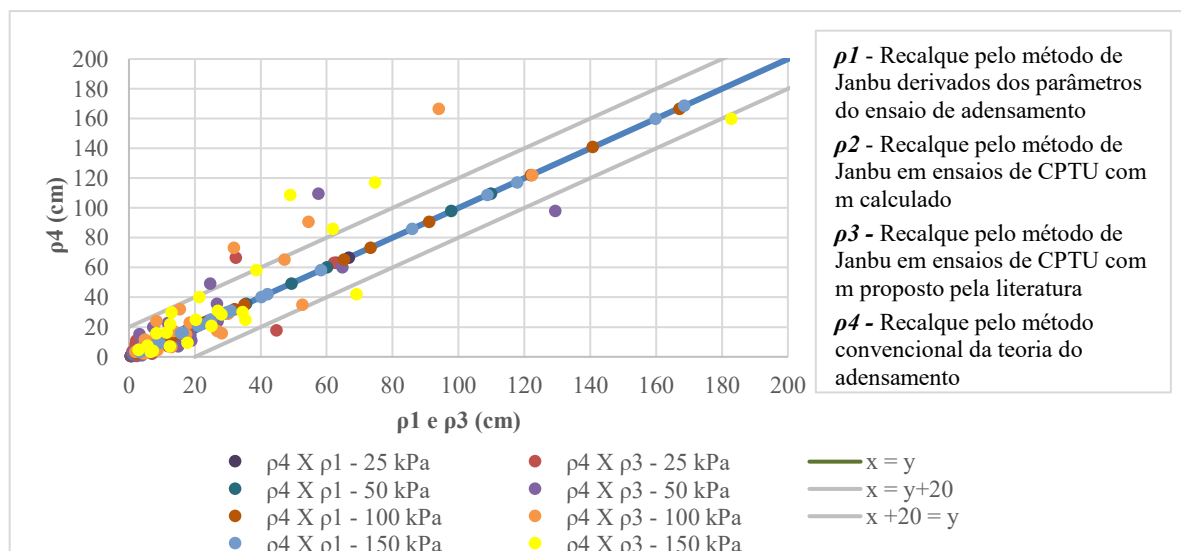
ρ_2 ficaram sobre a linha de igualdade e fora das linhas cinzas, que representam uma variação de 20 cm, significando que ρ_2 possui valores inferiores a ρ_4 . Esta diferença pode ser percebida ao comparar os gráficos das Figura 28, com todos os métodos plotados, e Figura 29, recalques plotados sem ρ_2 .

Figura 28 – ρ_1 , ρ_2 e ρ_3 versus ρ_4



Fonte: autoria própria (2022).

Figura 29 – ρ_1 e ρ_3 versus ρ_4

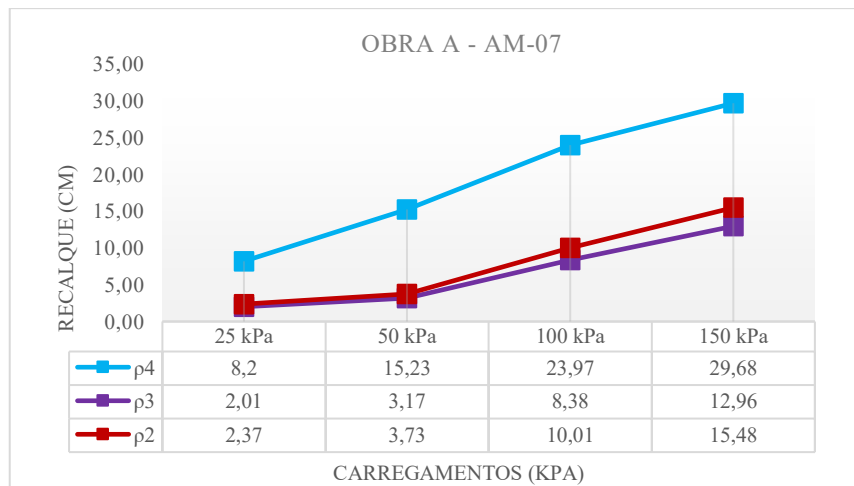


Fonte: autoria própria (2022).

Verificando cada obra individualmente, observou-se algumas exceções no comportamento dos materiais para os diferentes métodos. A amostra 7 da obra A, caracterizada

tátil-visualmente como argila orgânica, apresentou recalques com maiores magnitudes na análise por adensamento, visto a declividade da reta virgem ser elevada e a tensão de pré-adensamento ser muito baixa, possivelmente justificada pela qualidade da amostra coletada classificar-se como ruim, com fator $\Delta e/e_0$ de 0,08, sofrendo um possível amolgamento. Estes resultados não se repetiram pelo ensaio de piezocone, onde o material apresentou certa resistência de ponta e tensões de pré-adensamentos maiores, deixando-o com o comportamento de um solo mais grosseiro, com certa resistência e menor compressibilidade. A Figura 30 demonstra os resultados obtidos para esta amostra em todas as sobrecargas aplicadas, evidenciando as diferentes magnitudes dos métodos.

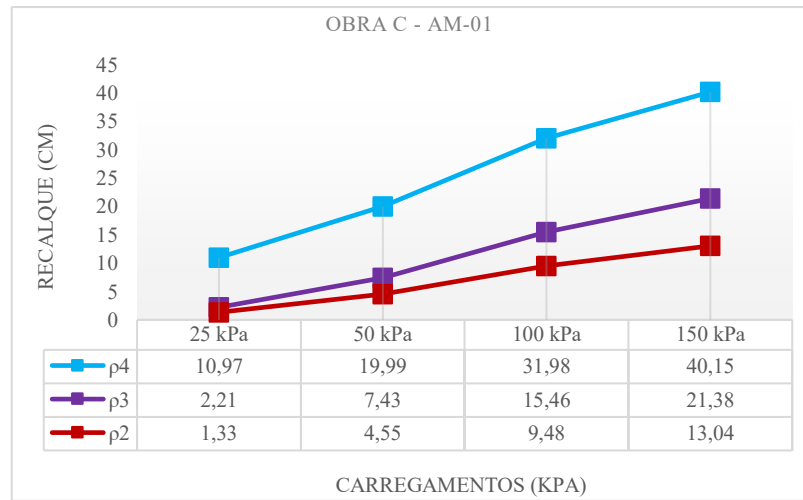
Figura 30 – Recalques para todos os carregamentos da AM-07 da obra A



Fonte: autoria própria (2022).

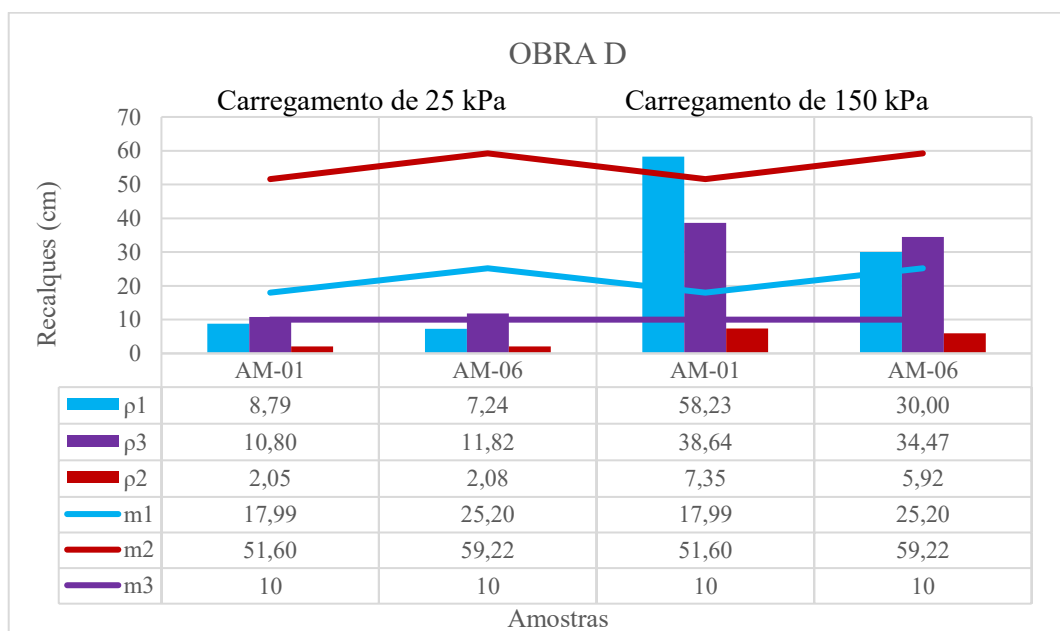
Este mesmo problema pode ser visualizado para a amostra 1 da obra C, que por adensamento apresentou recalques mais consideráveis, devido as deformações estarem no seu trecho plástico, conforme resultados na Figura 31. Considerando o índice de vazios inicial da amostra de 2,62 e o índice de vazios na tensão efetiva vertical de 2,19, o fator $\Delta e/e_0$ resultou em 0,19. Segundo as classificações apresentadas na Tabela 1, para o OCR de 1,2, em todas as literaturas demonstradas, a amostra qualificou-se como muito ruim. Este possível amolgamento do solo pode afetar diretamente a inclinação da reta virgem na curva de adensamento, e consequentemente, a tensão de pré-adensamento. Portanto, pode-se elencar como uma das vantagens ao analisar-se os solos e os recalques no método de Janbu por CPTU, a mecanização dos resultados e a realização do ensaio *in situ*, sem a necessidade de execução de coleta de amostras, e consequentemente, com possíveis interferências do meio retirá-las e transportá-las, com as reais condições de tensões e umidades.

Figura 31 – Recalques para todos os carregamentos da AM-01 da obra C



Fonte: autoria própria (2022).

Os solos coletados na obra D, em São José (SC), foram os que apresentaram maiores variações na aplicação do método, com número de módulo ($m2$) e recalques ($\rho2$) bem distintos. Isto evidenciou-se, por este solo fino ter a presença elevada de materiais mais grosseiros, com menor coesão, deixando-o com resistências de ponta altas e menores deformações no ensaio de piezocone. Estes resultados podem ser vistos na Figura 32, identificando em barras os recalques e em linhas o número de módulo para métodos adotados, demonstrando a grande influência do valor de m na magnitude dos recalques.

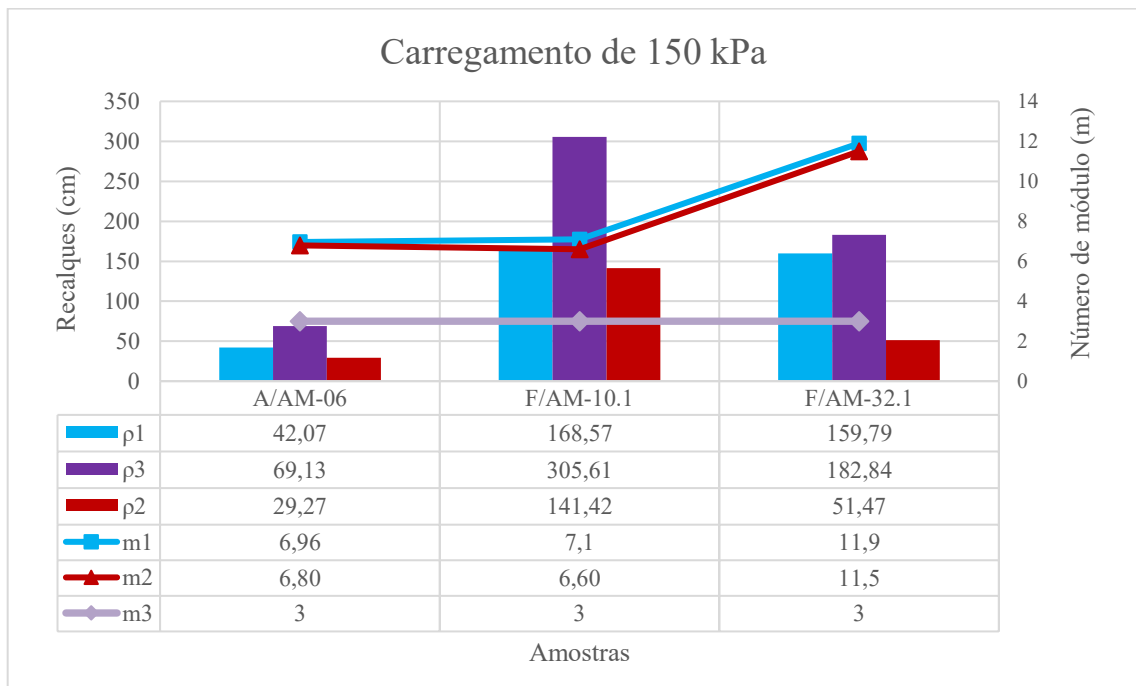
Figura 32 – Números de módulo (m) e recalques para a obra D

Fonte: autoria própria (2022).

No estudo deste trabalho existem três amostras que se caracterizam como turfas, solos altamente orgânicos, que geralmente apresentam alto teor de umidade, baixo peso específico relativo dos sólidos e baixo peso específico (DAS, 2007). Os elevados índices de vazios presentes são decorrentes do fato de serem solos de sedimentação recente, com baixa capacidade de suporte, normalmente adensados e extremamente compressíveis (PINTO, 2006). Estas propriedades foram verificadas nas amostras 6 da obra A, 10.1 e 32.1 da obra F, com baixas tensões de pré-adensamento e elevadas magnitudes de recalques.

Para analisar ρ_3 , determinou-se que o m adotado no método de Janbu para turfas seria igual 3, porém, ao compará-los com os obtidos no adensamento (ρ_1) e no CPTU (ρ_2), percebeu-se que esta consideração fora conservadora, apresentando diferenças consideráveis nas deformações em relação aos outros métodos, conforme visto na Figura 33.

Figura 33 – Números de módulo e recalques para as turfas no carregamento de 150 kPa



Fonte: autoria própria (2022).

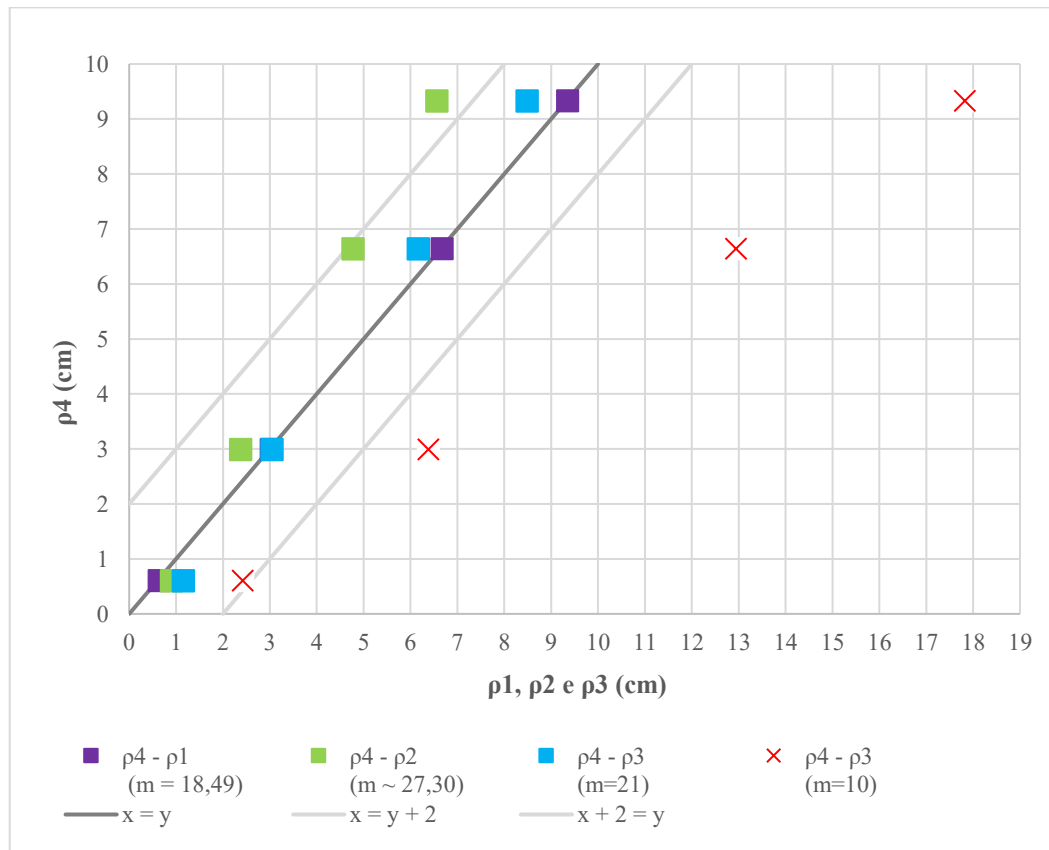
A fim de aprimorar os resultados da amostra 11 da obra E, realizou-se uma retroanálise, verificando qual valor de número de módulo deveria ser adotado para ρ_3 aproximar-se dos recalques estabelecidos pelo método de adensamento (ρ_4), partindo do pressuposto de que esta é a abordagem convencional na determinação de magnitudes de recalques. Seguindo os critérios inicialmente definidos, o m adotado foi 10, gerando recalques

de maiores magnitudes e com altas variações percentuais em relação ao adensamento, conforme pode-se verificar os pontos vermelhos em X na Figura 34.

Para obter magnitudes mais aproximadas ao método de adensamento, propôs-se a utilização do m igual a 21, gerando os quadrados azuis na Figura 34. Com esta análise, pode-se concluir que o número de módulo do solo estava conservador, considerando possivelmente um material de qualidade inferior ao real apresentado, sendo que o solo desta amostra se caracterizou como um silte argiloso com massa específica de $1,73 \text{ g/cm}^3$.

Salienta-se ainda, que mesmo que os resultados deste trabalho considerem como referencial, os obtidos nos recalques pela teoria do adensamento, não se pode afirmar que este seja o correto, sendo apenas o mais tradicional método adotado.

Figura 34 – Recalques para a amostra 11 da obra E



Fonte: autoria própria (2022).

6. CONCLUSÃO

O estudo deste trabalho visou demonstrar a pertinência da aplicação do método de Janbu em ensaios de piezocone para estimar recalques e comparar com os resultados derivados do método convencional pelo ensaio de adensamento unidimensional em solos finos. Para isto, fez-se o uso de 25 amostras coletadas para realização de ensaios de adensamentos e 20 verticais de ensaios de piezocone, na região litorânea de Santa Catarina e de Pernambuco. Dentro da gama de materiais finos e coesivos existentes, este estudo utilizou-se solos como turfas, de baixíssima resistência e alta compressibilidade, até siltes com materiais mais grosseiros e resistentes.

O método de Janbu, descrito por Fellenius (2006), usa como base para estabelecer as magnitudes dos recalques os parâmetros m e mr , apresentados pela literatura em intervalos de valores típicos para diferentes tipos de solos. Ainda, permite que estes parâmetros sejam calculados por correlações aos obtidos dos ensaios de adensamento e pelos resultados de ensaios de CPTU, sendo esta, outra análise comparativa apresentada neste trabalho.

Os valores de ml e $mr1$ derivados dos coeficientes de compressibilidade, de recompressão e índice de vazios, do ensaio de adensamento, apresentaram resultados satisfatórios e dentro da faixa disposta na literatura dos materiais estudados de 5 a 20 para misturas de siltes e misturas de argilas, sendo apenas em três amostras valores ligeiramente superiores em amostras com presença de solos grosseiros.

As maiores diferenças fizeram-se presentes ao aplicar a metodologia no ensaio de CPTU. Neste ensaio, por determinar-se o parâmetro $m2$ para cada leitura, de 2 em 2 cm, leva-se em consideração a não homogeneização do solo, detectando-se resistências superiores em determinados pontos, pela presença de lentes de areia ou conchas marinhas entremeadas nas camadas de solos finos. Ainda assim, os valores calculados para cada amostra verificaram condizentes com os dispostos na literatura, com a grande maioria dentro do intervalo estimado.

Os solos com presença elevada de matéria orgânica, como turfas, os números de módulo calculados pelo ensaio de piezocone não ficaram dentro do intervalo estabelecido de 1 a 5 por Fellenius (2006). Mesmo com elevados valores de deformabilidade diante de espessas camadas, os limites propostos da literatura mostraram-se conservadores, pois as amostras obtiveram números de módulo entre 5 e 11,5. Como este material é de difícil caracterização e pode apresentar distintos comportamentos nas suas variações, acredita-se que o intervalo

especificado seja de confiabilidade, indo a critério do engenheiro projetista estipular, conforme a sobrecarga, espessura e propriedades de cada material analisado, o método a adotar.

Para a verificação de recalques, pode-se identificar a mesma tendência apresentada pelo parâmetro (m) base de estimativa de deformações no método de Janbu, justificando-se pelas incógnitas serem altamente dependentes e inversamente proporcionais. Nesta análise efetuaram quatro diferentes metodologias com quatro carregamentos, indo de 25 kPa a 150 kPa, nas 25 camadas definidas.

Na primeira metodologia para estimar recalques ($\rho4$), por adensamento primário unidirecional, considerou-se uma camada homogênea pelos resultados de CPTU com os parâmetros obtidos da amostra coletada e ensaiada. Para cada uma delas, determinou-se o estado de tensões atuantes e as deformações verticais sofridas para os incrementos de carga de 25, 50, 100 e 150 kPa. Com os parâmetros estabelecidos no ensaio de adensamento, calculou-se para o método de Janbu, $m1$ e mrl , obtendo-se os recalques na camada determinada pela segunda metodologia ($\rho1$). Como os parâmetros são correlacionados e definidos por equacionamentos derivados, verificou-se mínimas diferenças nos resultados, com variações milimétricas para todas as amostras, dentro do esperado.

A terceira análise de deformações consistiu-se na aplicação do método de Janbu em ensaios de piezocone ($\rho2$), considerando as resistências de ponta de cada leitura para estabelecer microdeformações, com seu somatório resultando na deformação da camada analisada. Esta metodologia, por ser mais criteriosa e representar melhor a estratigrafia do terreno, apresentou valores mais singulares de recalques, com a mesma justificativa de gerar números de módulo superiores ao demais.

E por fim, a quarta e última metodologia aplicada foi a adoção de números de módulo ($\rho3$), seguindo valores típicos exemplificados na literatura, definindo camadas de misturas de siltes ou argilas com mesmo comportamento, apenas considerando resistências de ponta elevadas para presença de materiais grosseiros. Nesta análise, as estimativas de recalques apresentaram-se, num geral, com medidas aproximadas as obtidas pelas amostras de adensamento.

Como os procedimentos foram realizados em quatro carregamentos, percebeu-se uma tendência de maiores variações em magnitude entre os métodos conforme a carga aumentou, sendo em alguns materiais mais compressíveis, diferenças significativas. Os métodos que consideraram a camada de solo homogênea foram os que apresentaram uma variação considerável com os incrementos de carga, visto não considerar a interferência de materiais grosseiros presentes.

Ainda, que os resultados apresentados sejam de magnitudes aceitáveis, deve-se observar atentamente a categorização do material perante os critérios de adoção do número de módulo (m) ou do coeficiente modificador (a), pois estes fatores influenciam diretamente nos recalques obtidos. Como demonstrado na avaliação da amostra 11 da obra E, a adoção do número de módulo igual a 10 influenciou em deformações com cerca de 90% a 300% superiores as previstas por adensamento, sendo necessária a utilização da retroanálise para verificar que o número de módulo que aproximaria das demais metodologias. Ao considerar esta modificação para m igual a 21, as porcentagens diferenciais ficaram entre 2% e 9% para os carregamentos de 50kPa, 100 kPa e 150 kPa, e na magnitude de 0,6 cm a 1,15 cm no carregamento de 25 kPa.

Em consequência das colocações explicitadas neste capítulo, concluiu-se que a aplicação do método de Janbu é válida na estimativa de recalques, seja com os valores conservadores da literatura ou com os resultantes de ensaios de piezocone, mesmo com variações para o método de adensamento. Os resultados derivados dos ensaios de CPTU são de alta confiabilidade para diversas análises, sendo a estimativa de recalques pelo método de Janbu mais uma utilidade apresentada por ele, com a vantagem de não ser necessário a coleta de amostras e a realização de ensaios de adensamento, economizando tempo e dinheiro aos projetistas.

REFERÊNCIAS

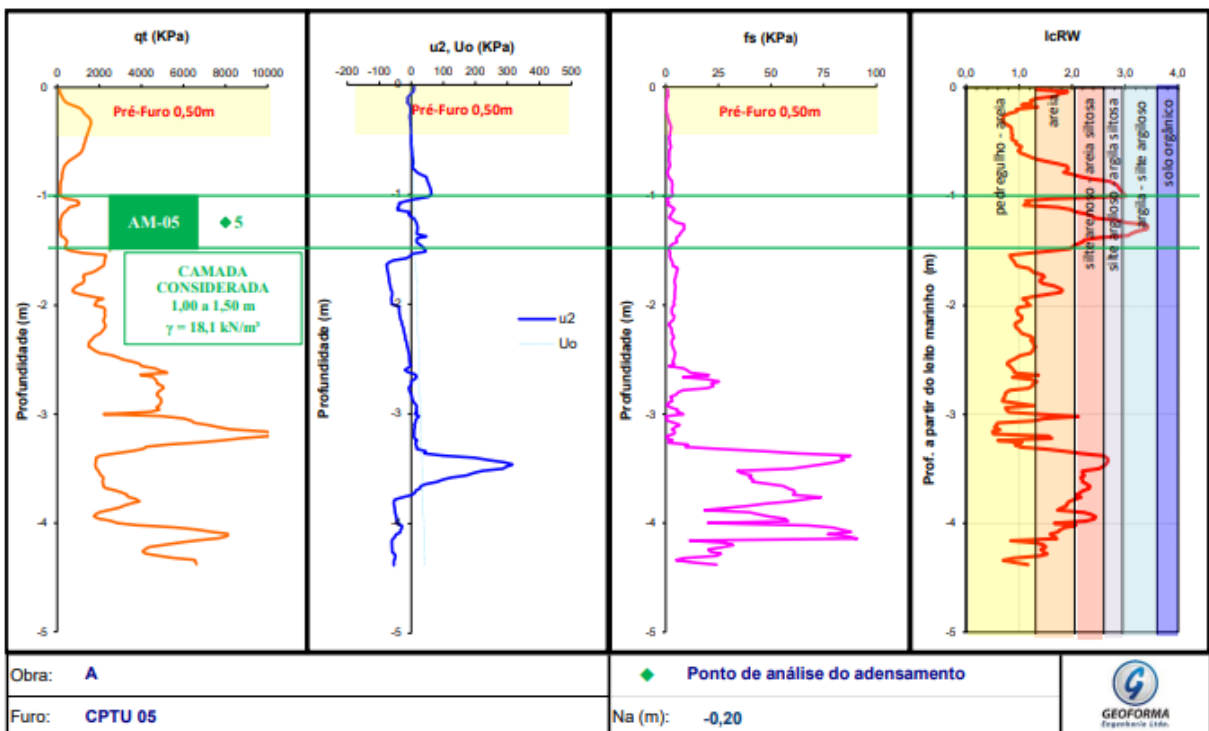
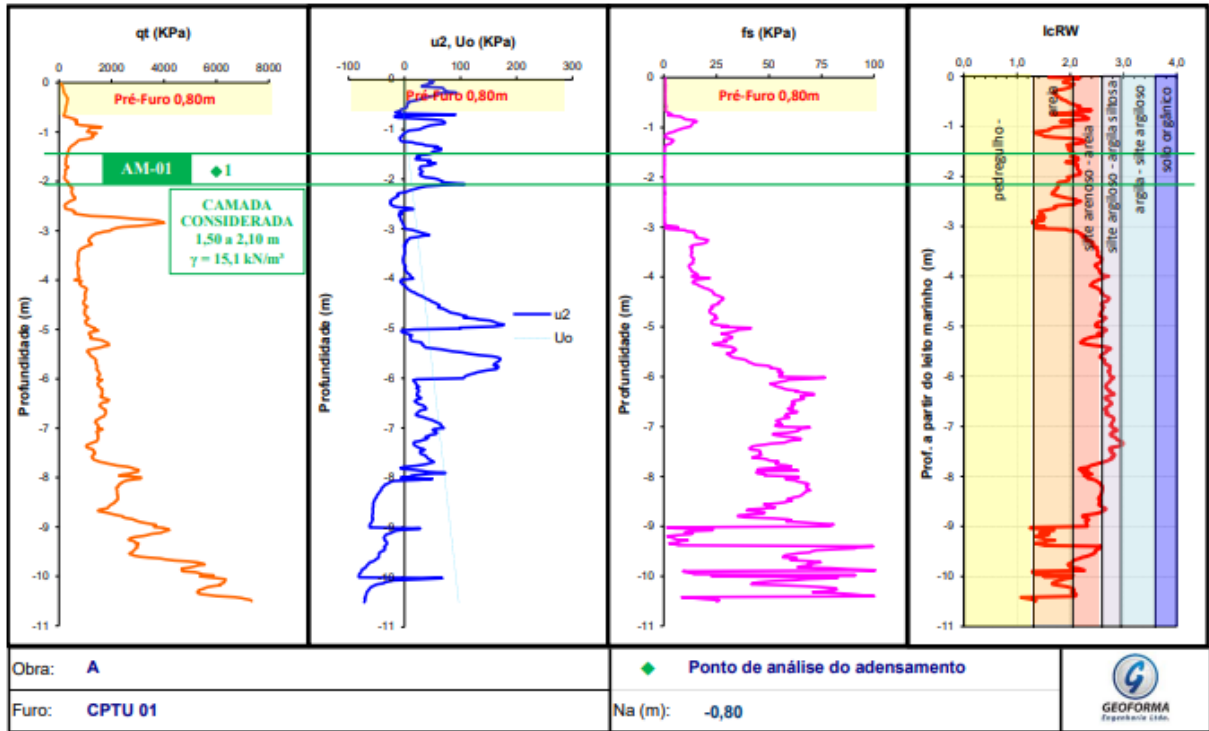
- ALMEIDA, M.; MARQUES, M. **Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16853**. Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- BARAN, K. **Propriedades geotécnicas de compressibilidade de uma argila mole em Itajaí-SC**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- CAPUTO, H. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.
- CARNEIRO, R. **Previsão do comportamento da argila mole da Baixada de Jacarépaguá: o efeito da submersão do aterro e do adensamento secundário**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- CLAYTON, C.; MATTHEWS, M.; SIMONS, N. **Site investigation**. 2. ed. Oxford: Blackwell Science, 1995.
- DAS, B. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.
- FELLENIUS, B. **Basics of foundation design**. Calgary: Eletronic Edition, 2006.
- HEIDEMANN, M. **Apostila de mecânica dos solos II: Resistência ao Cisalhamento**. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.
- KLAHOLD, P. **Interpretação de ensaios de campo em solos com permeabilidade intermediária**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- MARANGON, M. **Tópicos em geotecnia e obras de Terra**. Rio de Janeiro: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006.
- NIERWINSKI, H. **Apostila de mecânica dos solos I: Adensamento**. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.
- PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

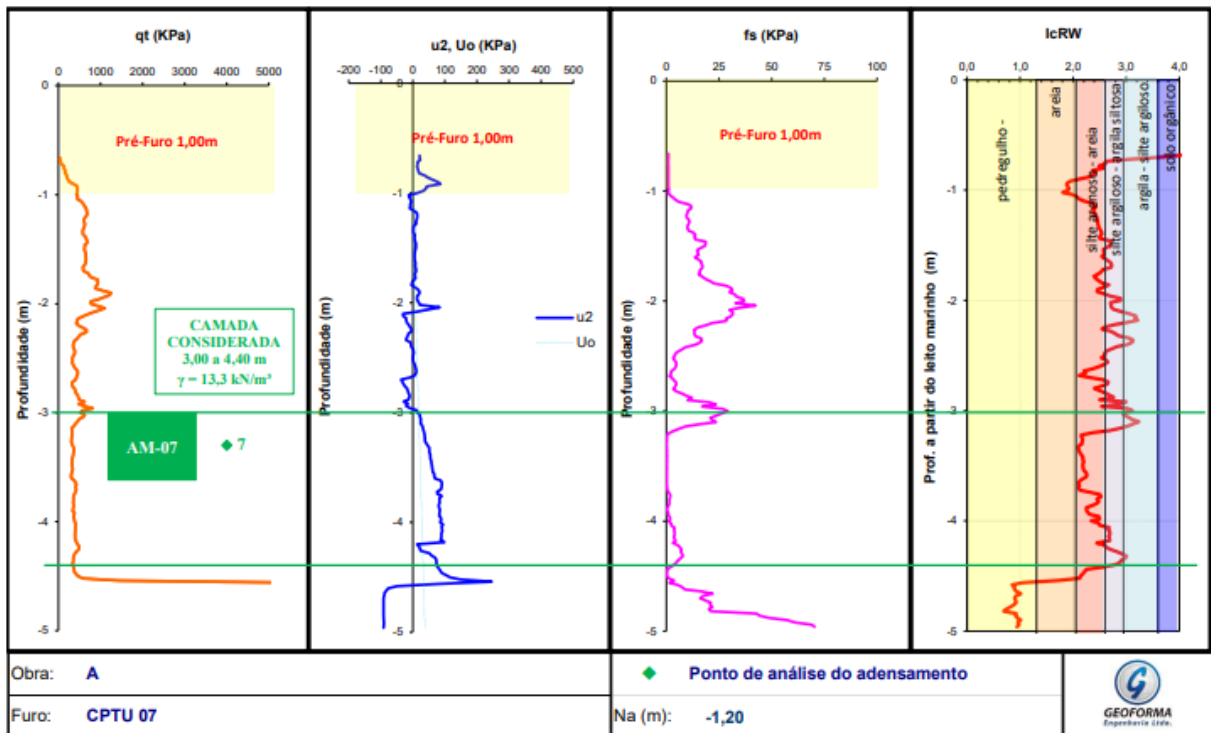
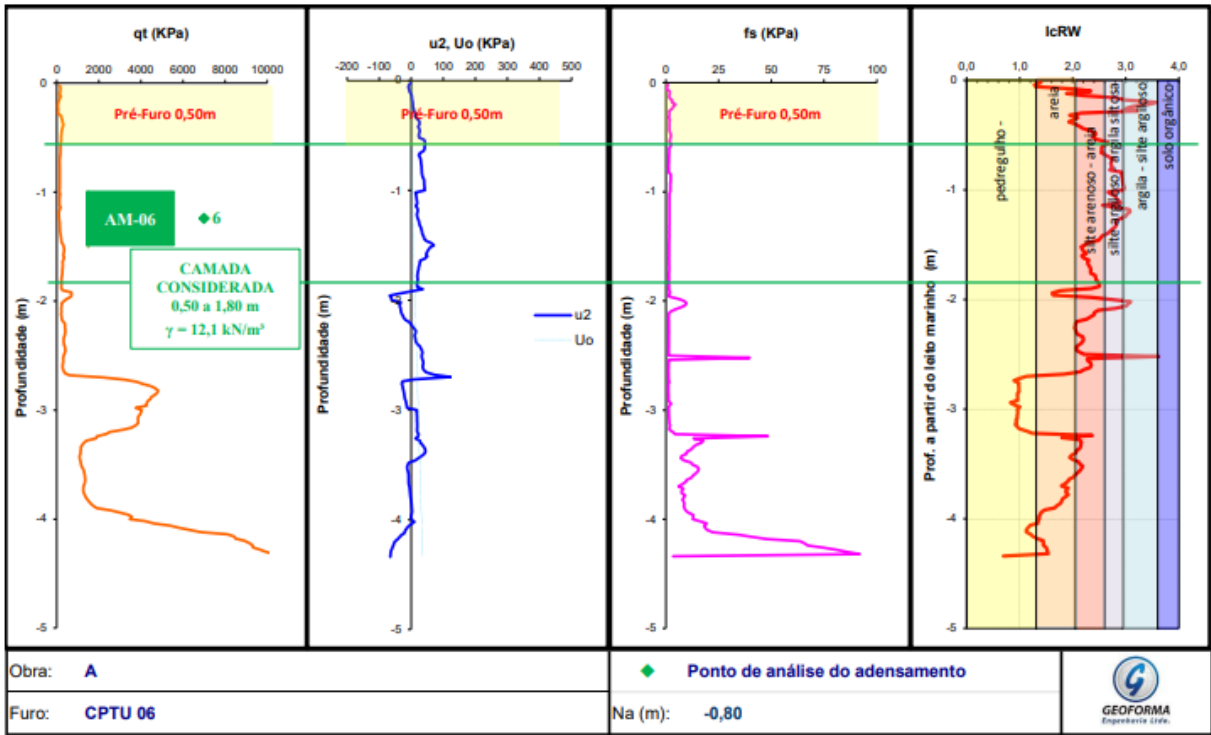
SOSNOSKI, J. **Interpretação de ensaios de CPTU e DMT em solos com permeabilidade intermediária**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

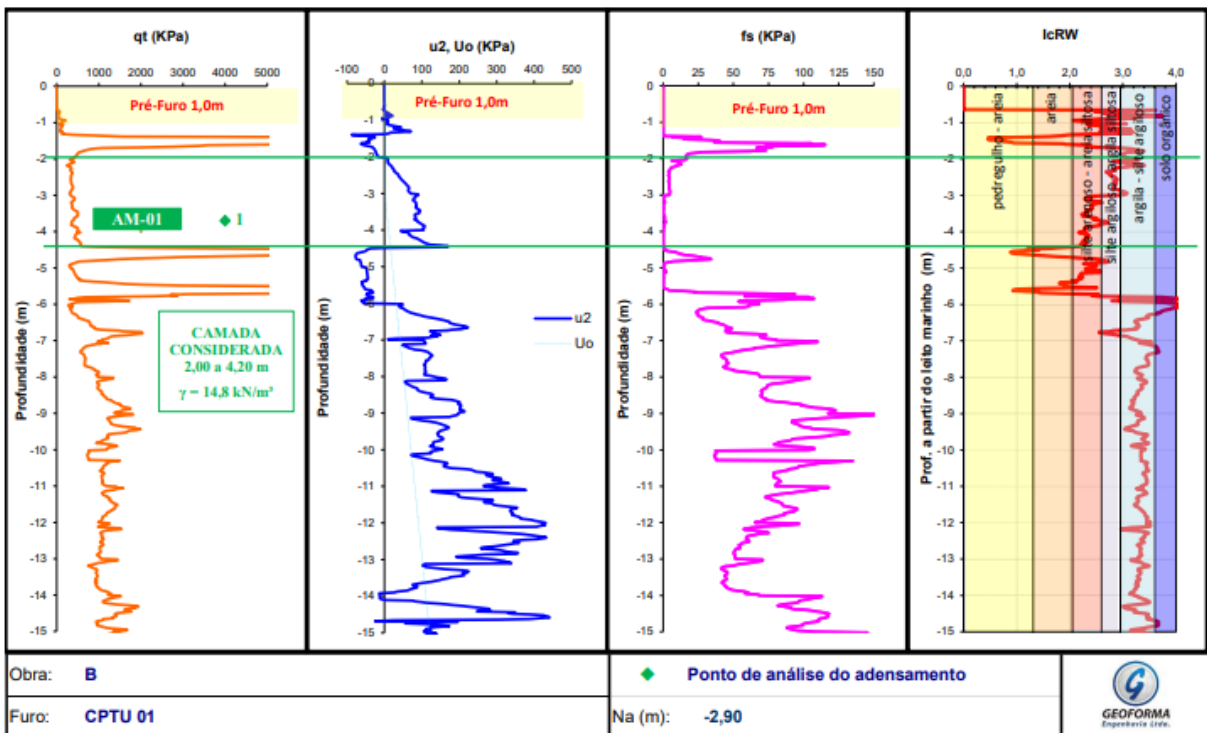
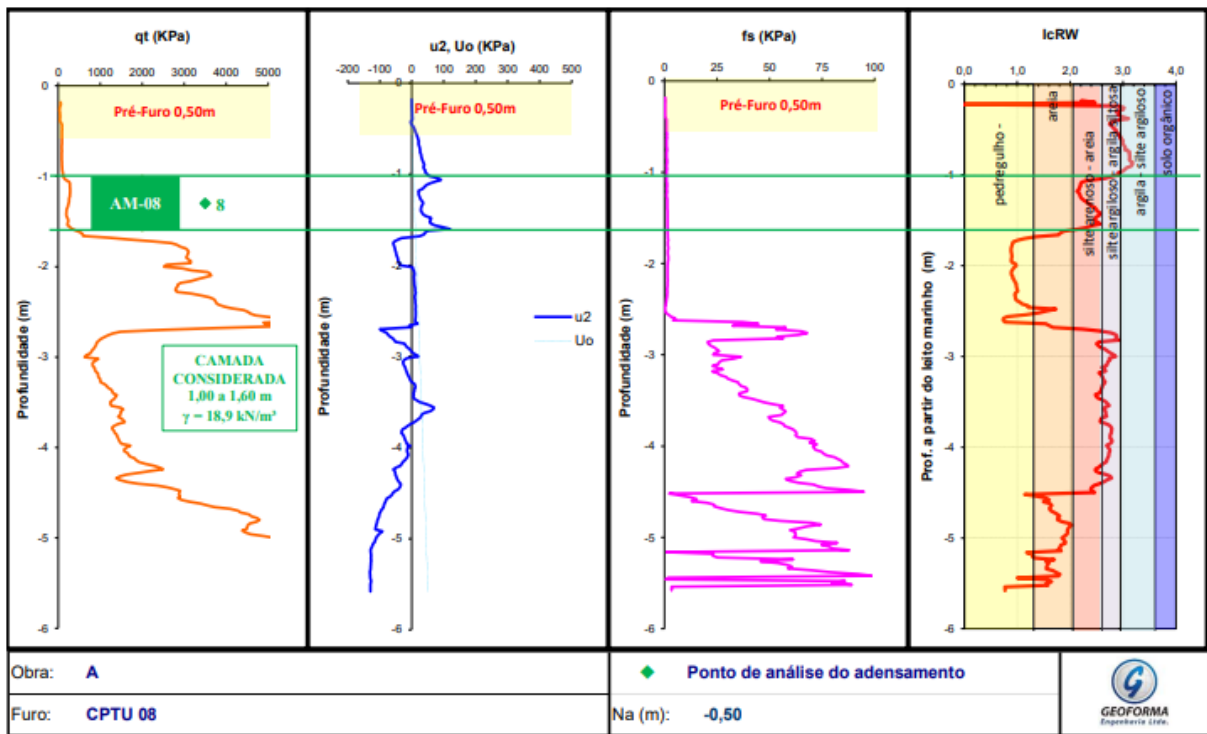
US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineering design: geotechnical investigations**. Manual 1110-1-1804. 2001. Disponível em: <https://www.publications.usace.army.mil/usace-publications/engineer-manuals/>. Acesso em: 2 mar. 2022.

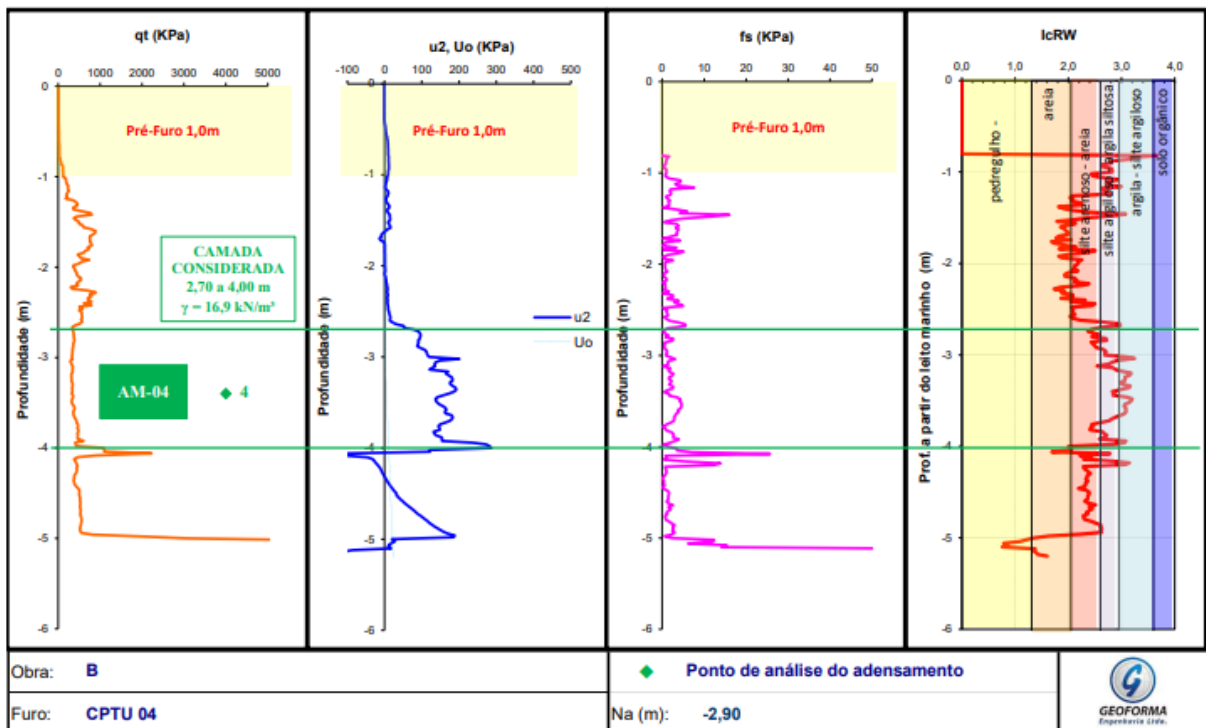
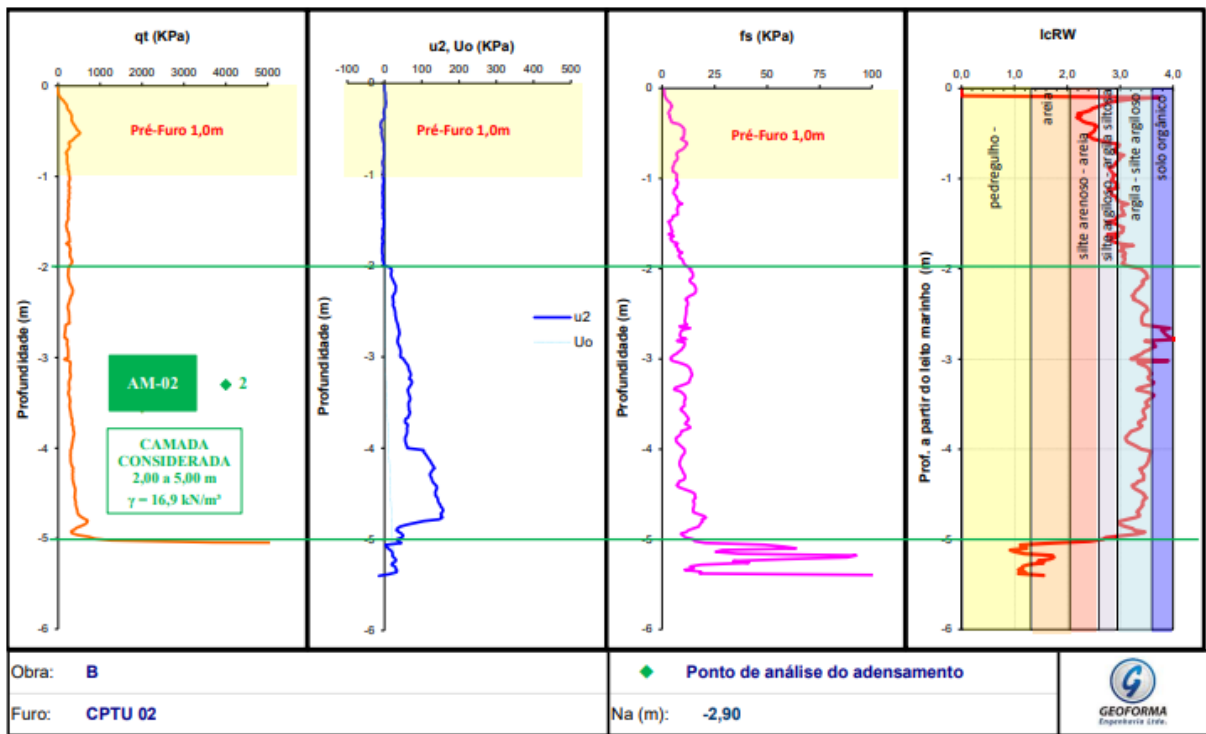
ANEXO A – Ensaios de Piezocone

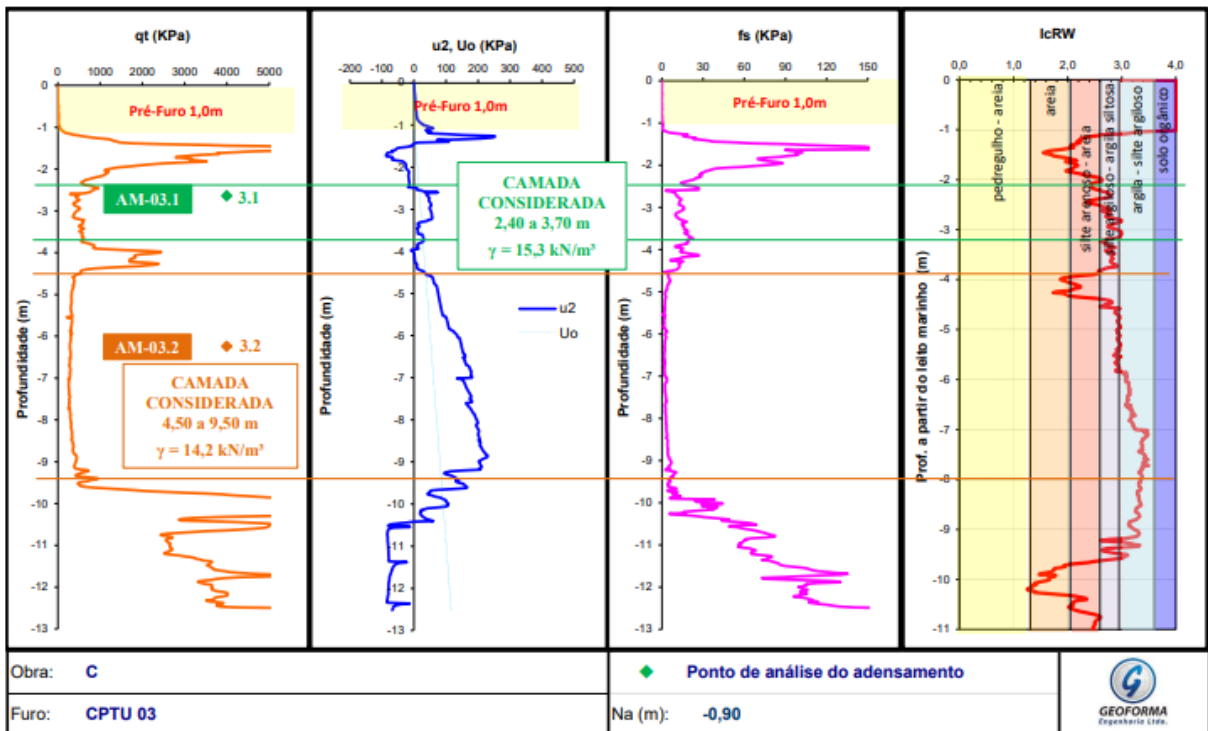
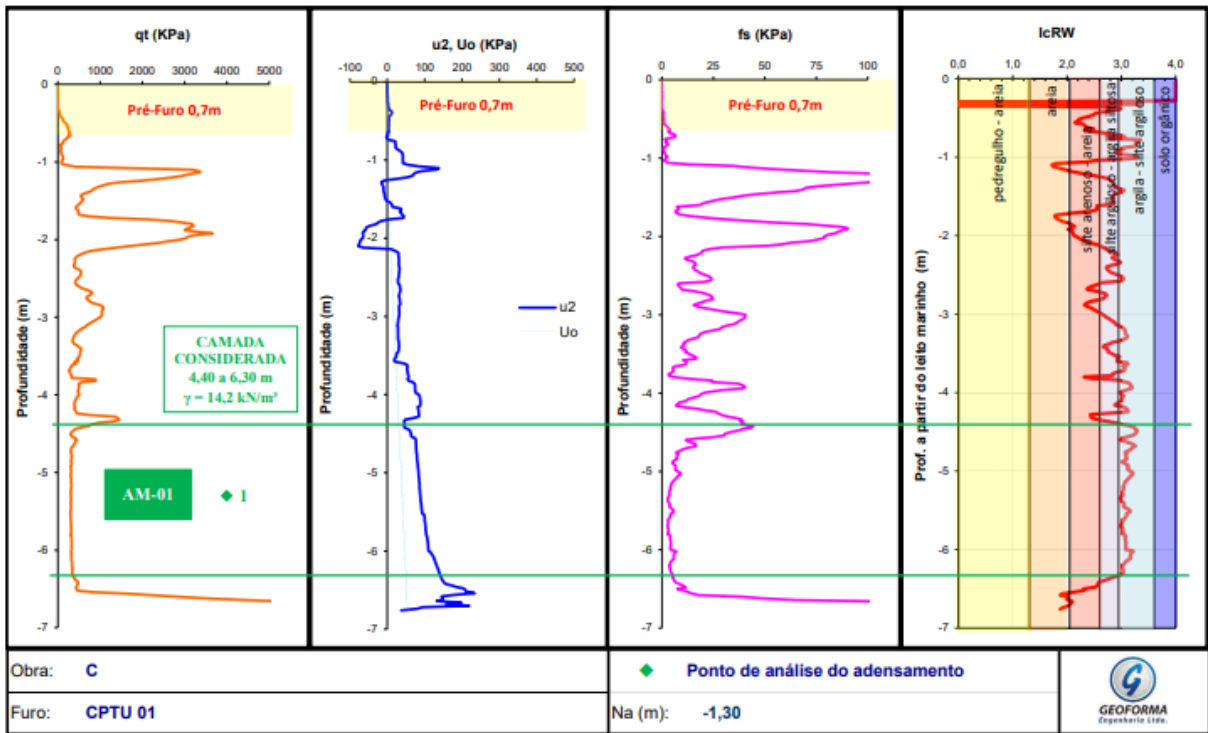
Salienta-se que estes anexos disponibilizados pela empresa Geofirma Engenharia Ltda foram adaptados para exemplificação das amostras e camadas consideradas neste trabalho.

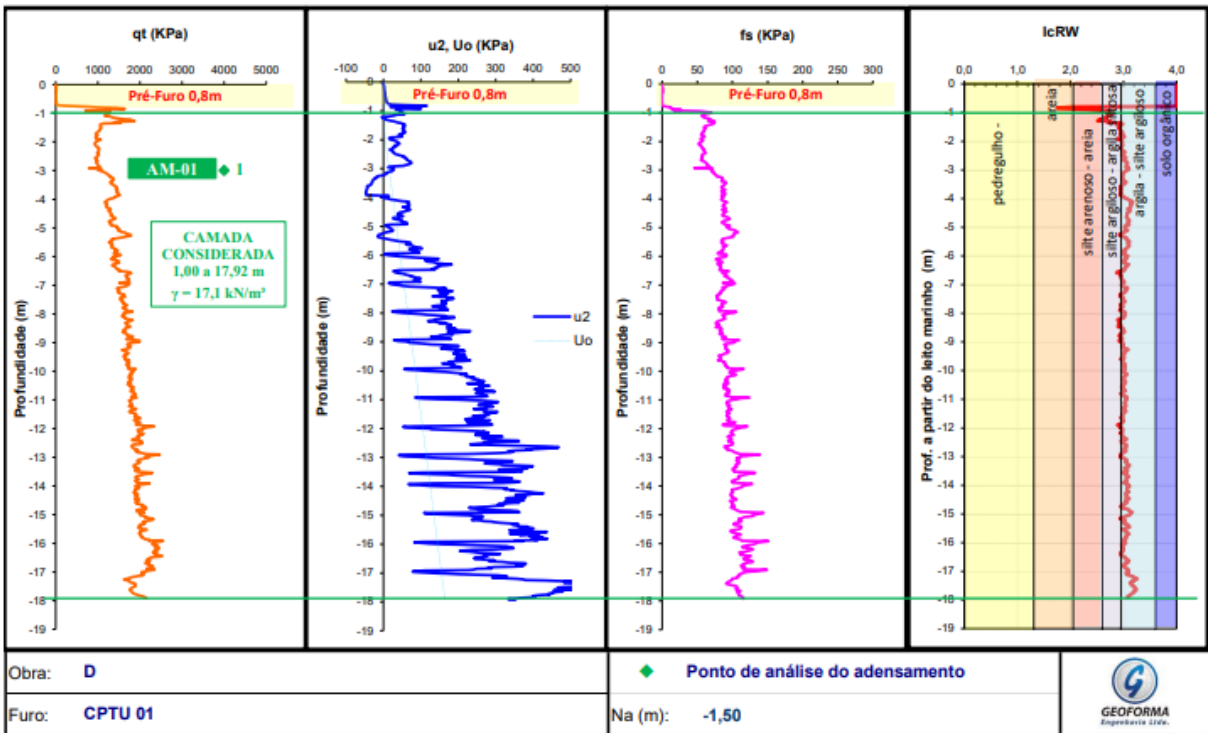
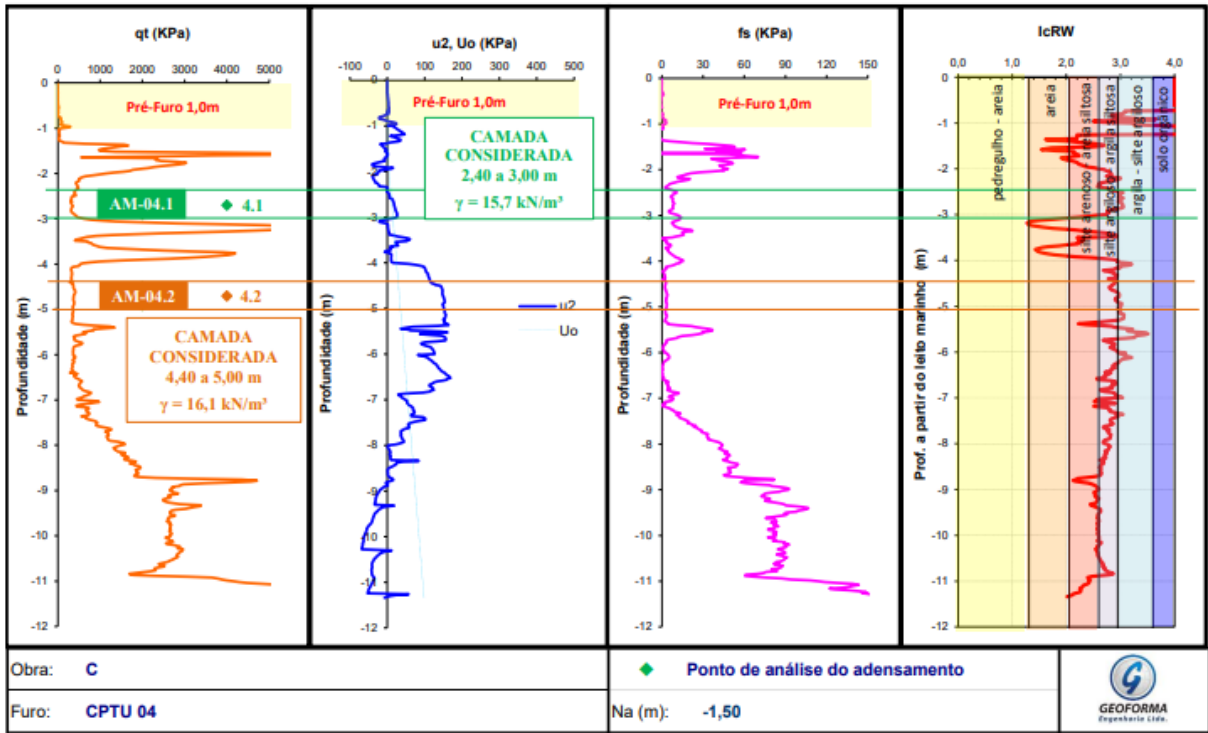


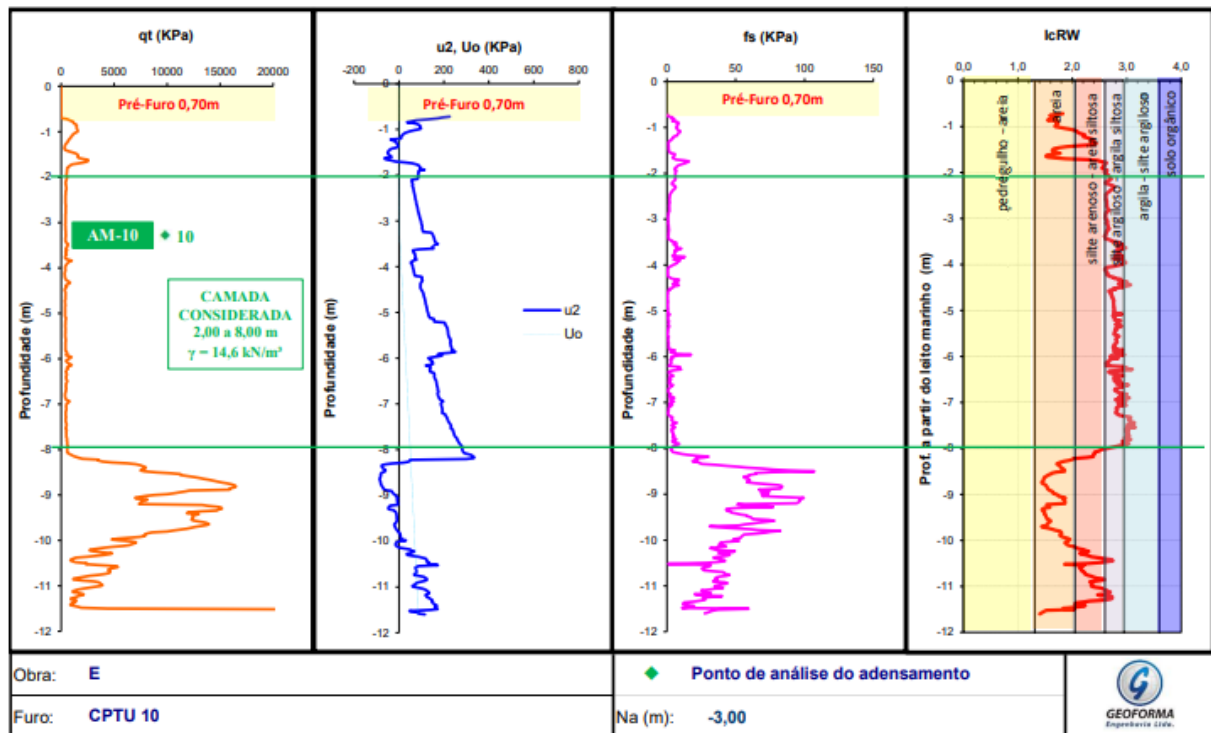
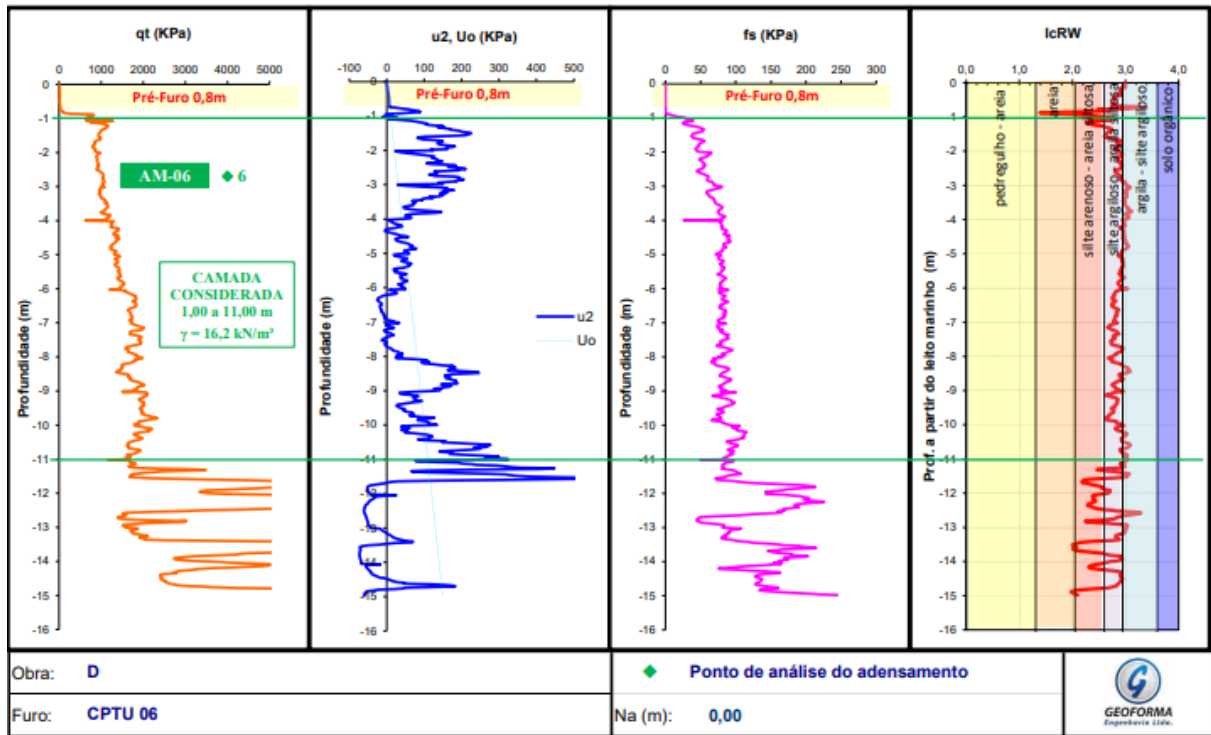


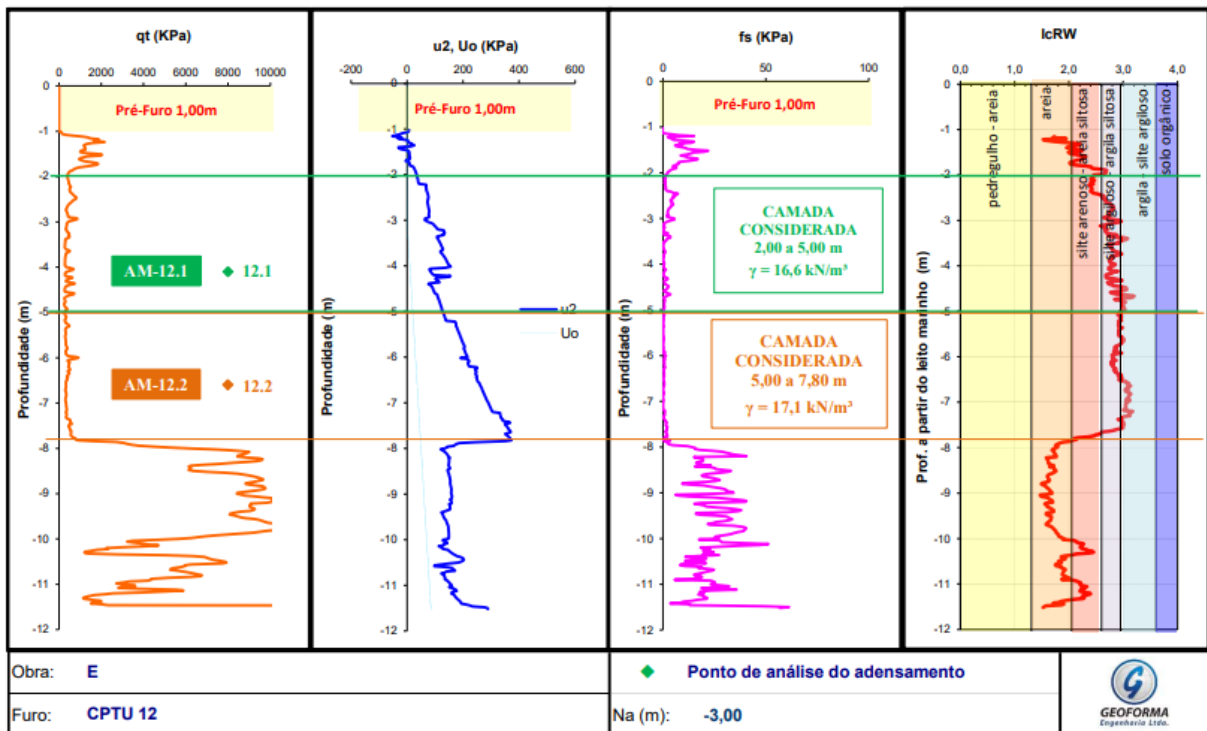
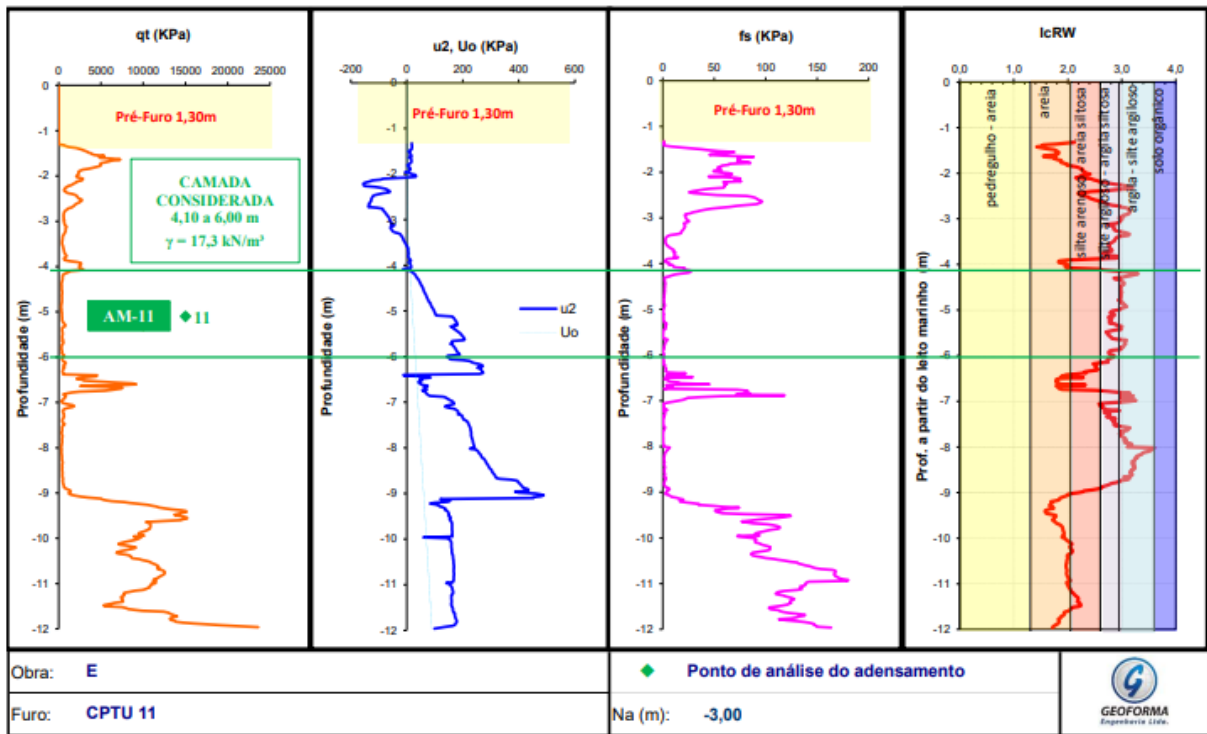


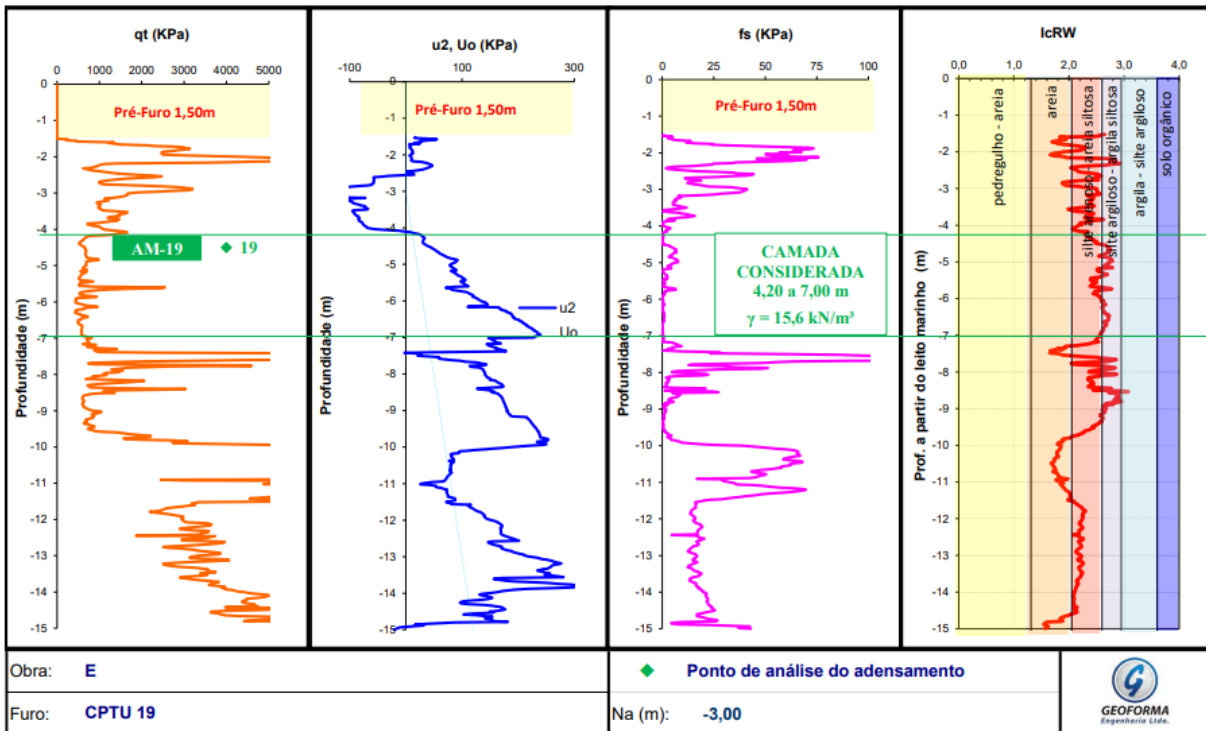
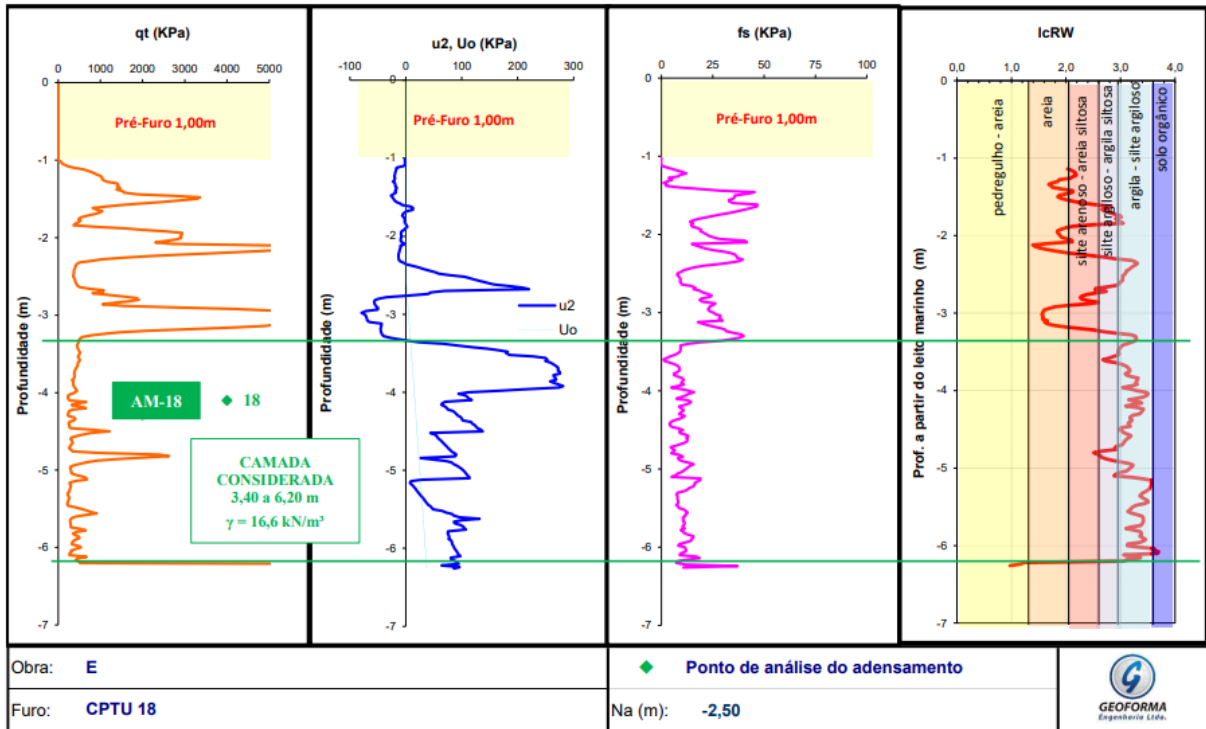


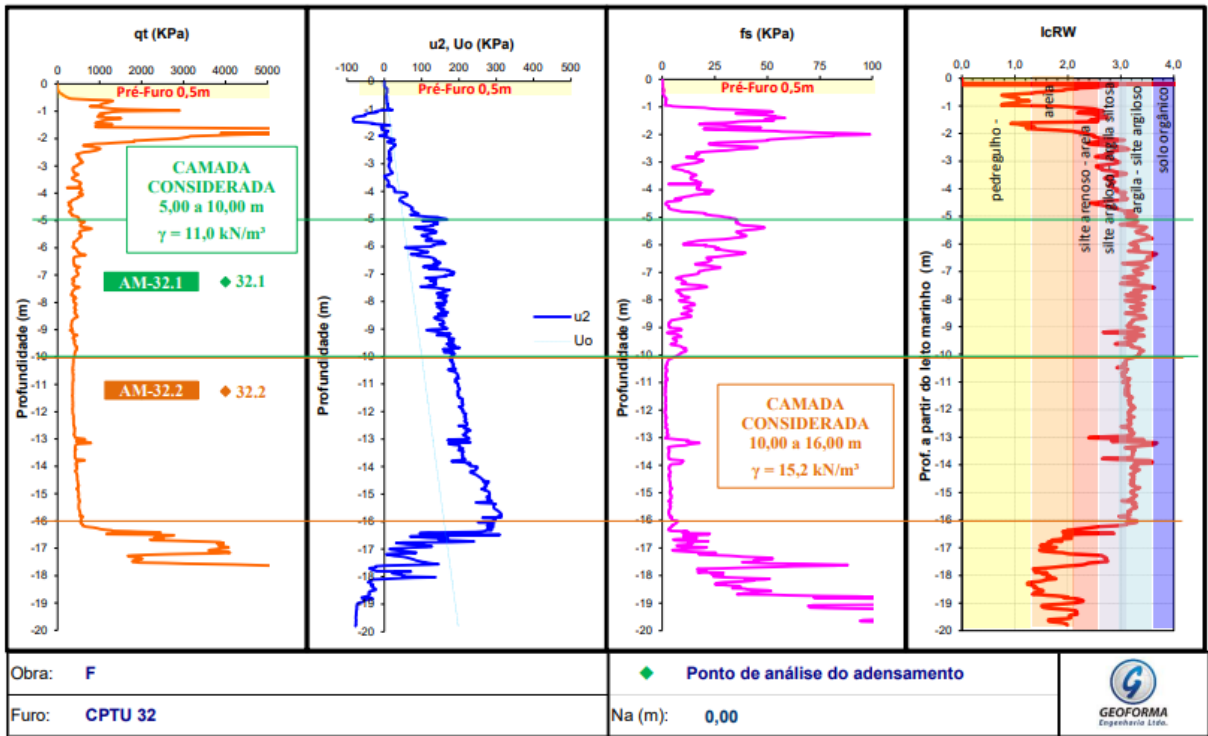
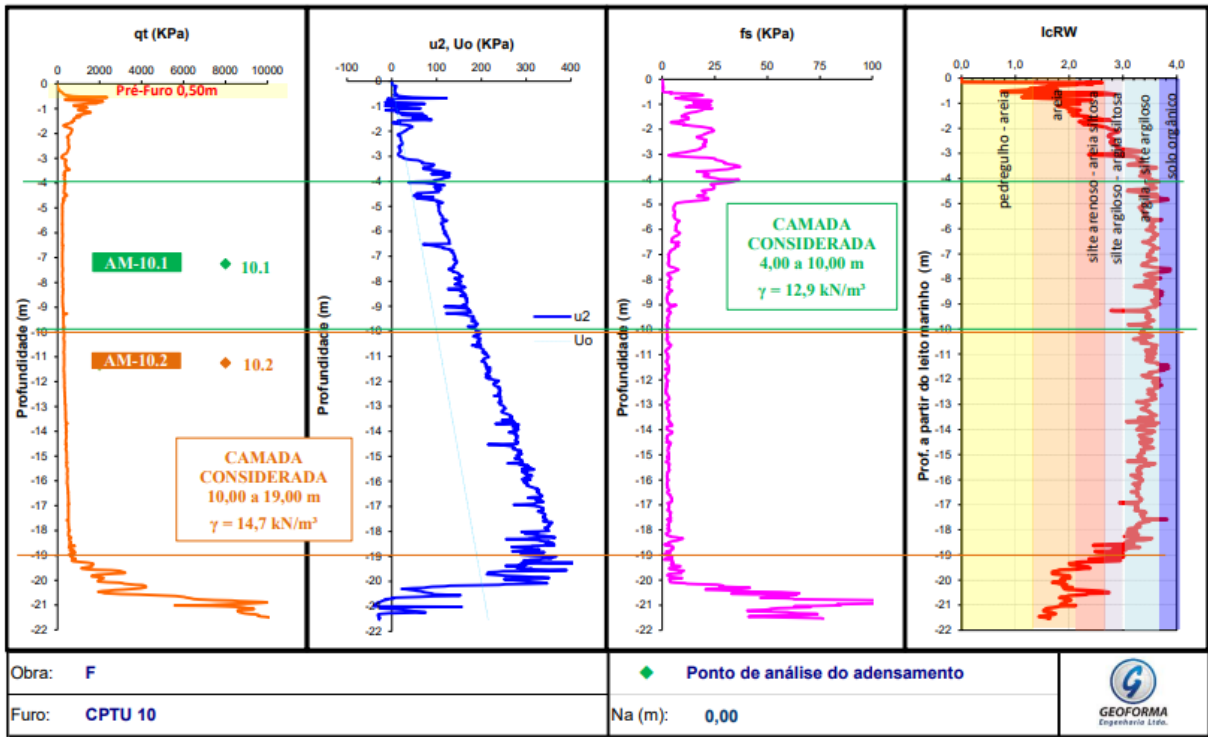




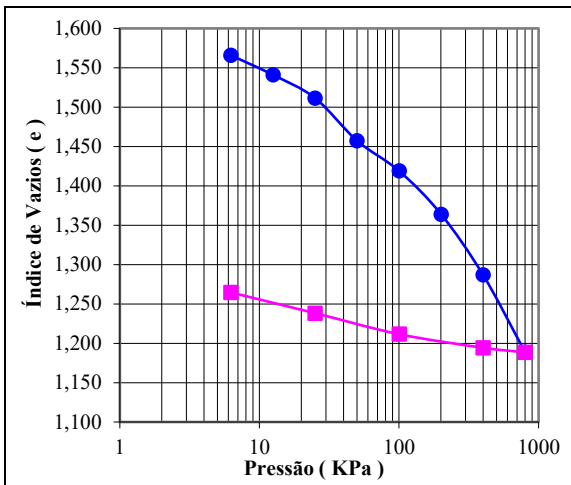




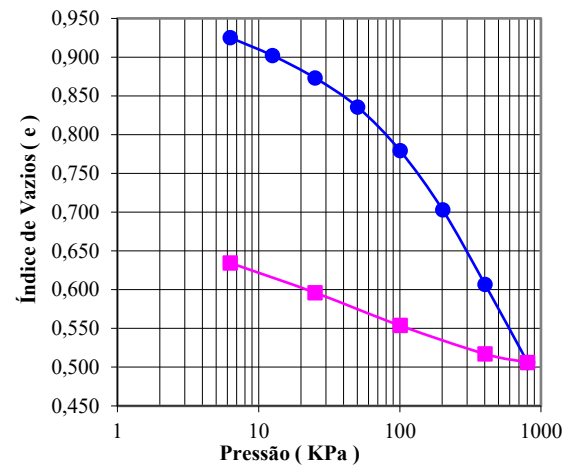




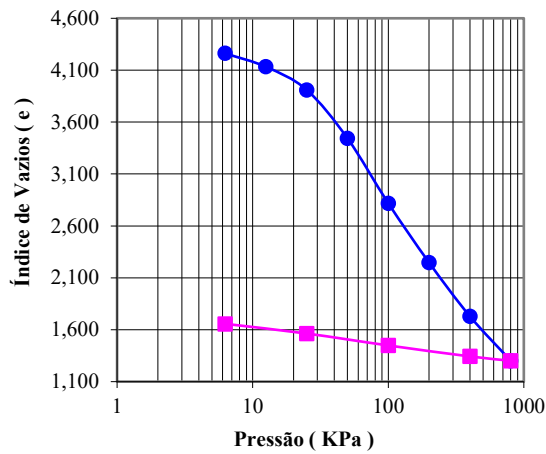
ANEXO B – Curvas de Adensamento



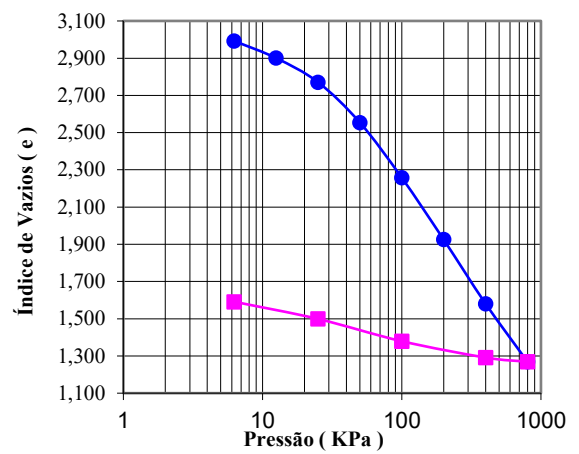
OBRA A – AM-01



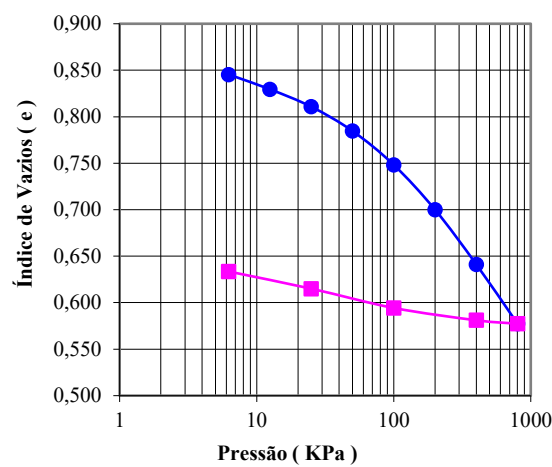
OBRA A – AM-05



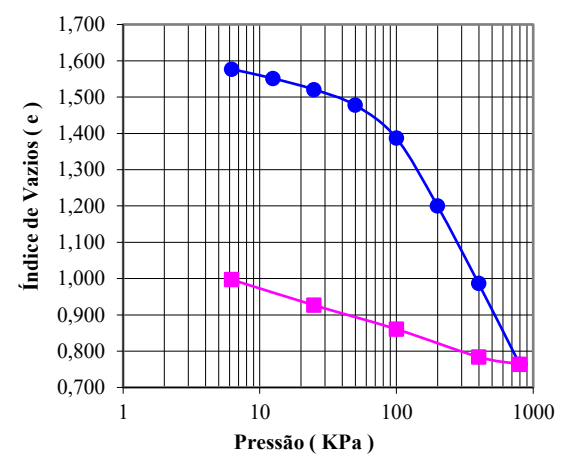
OBRA A – AM-06



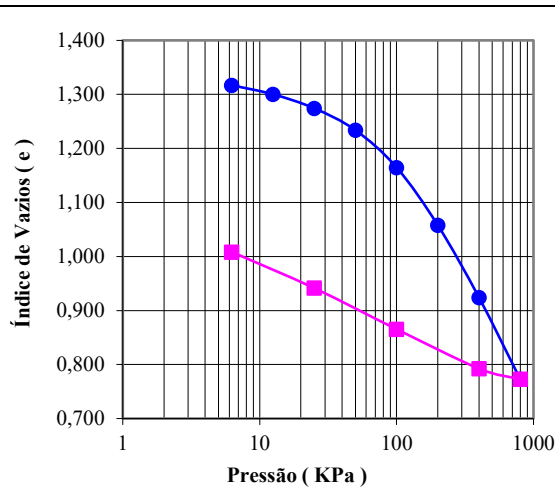
OBRA A – AM-07



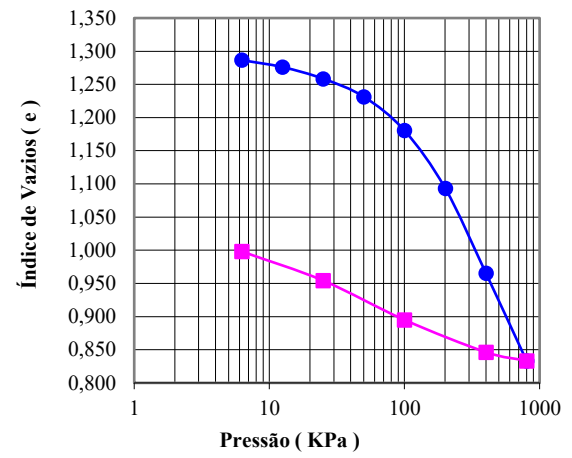
OBRA A – AM-08



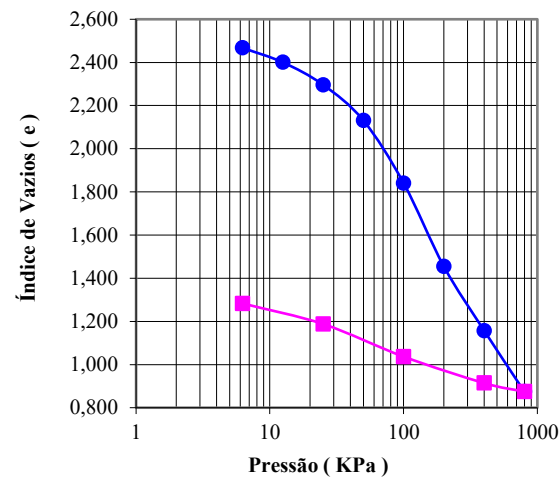
OBRA B – AM-01



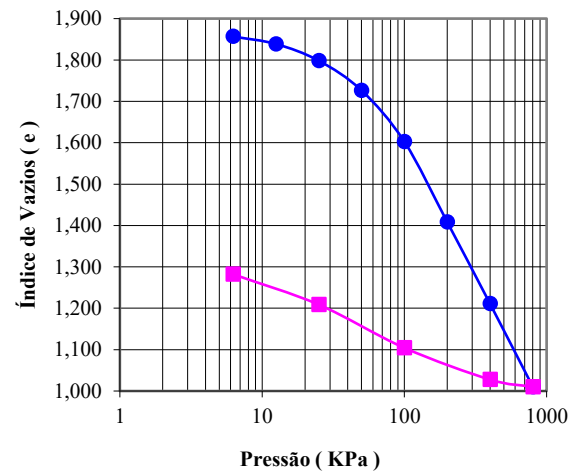
OBRA B - AM-02



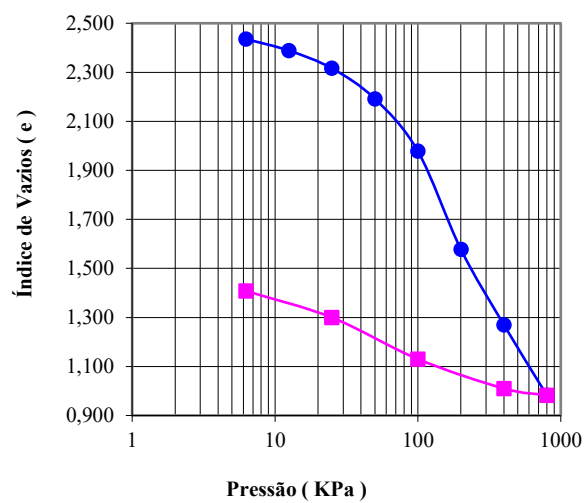
OBRA B - AM-04



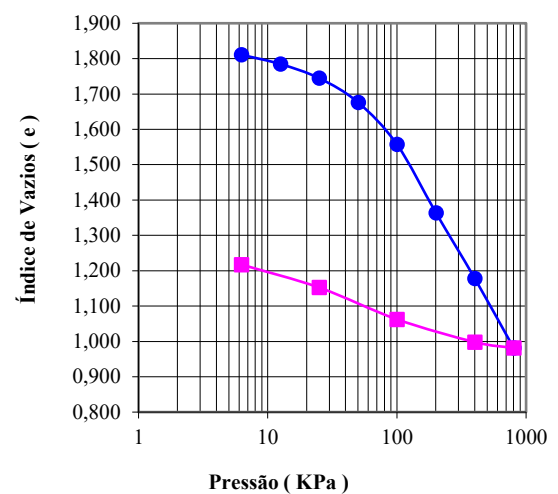
OBRA C - AM-01



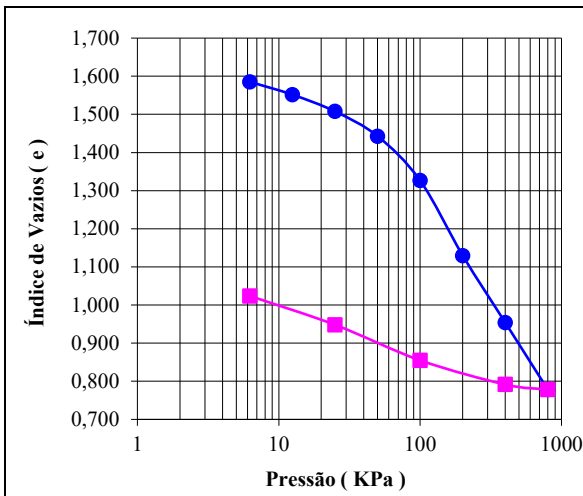
OBRA C - AM-03.1



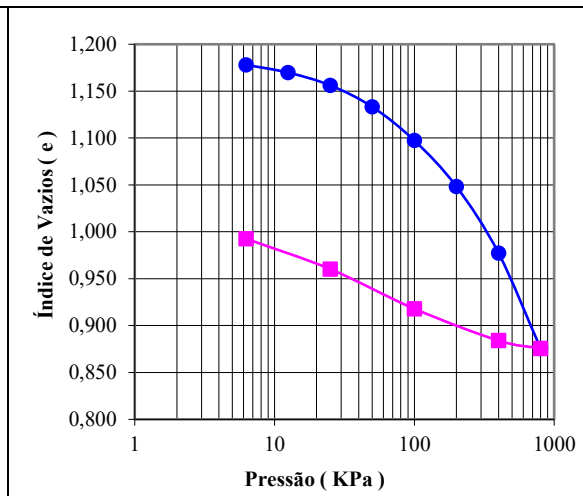
OBRA C - AM-03.2



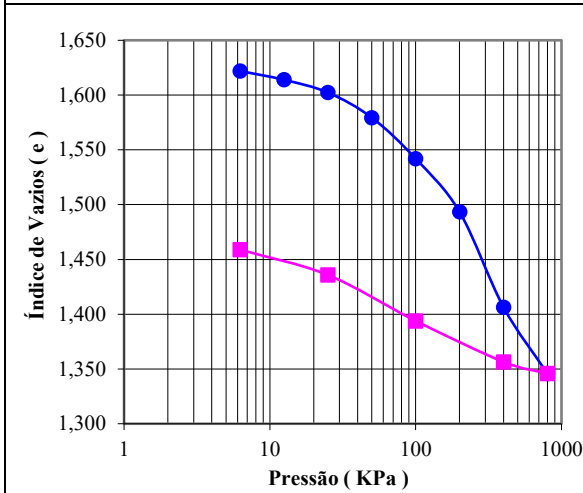
OBRA C - AM-04.1



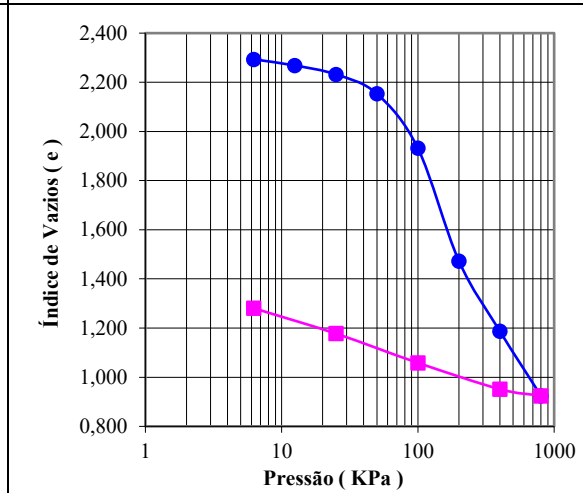
OBRA C - AM-04.2



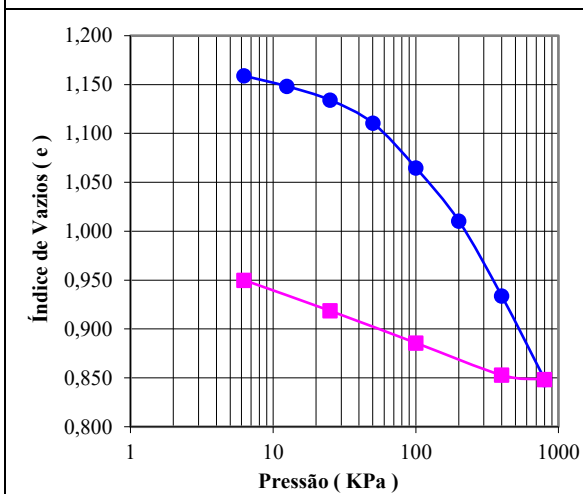
OBRA D - AM-01



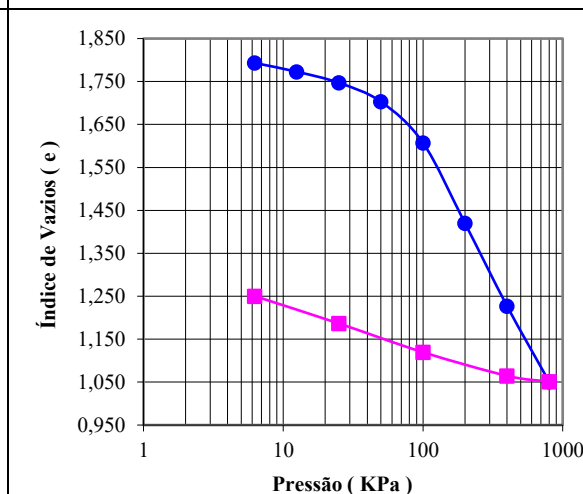
OBRA D - AM-06



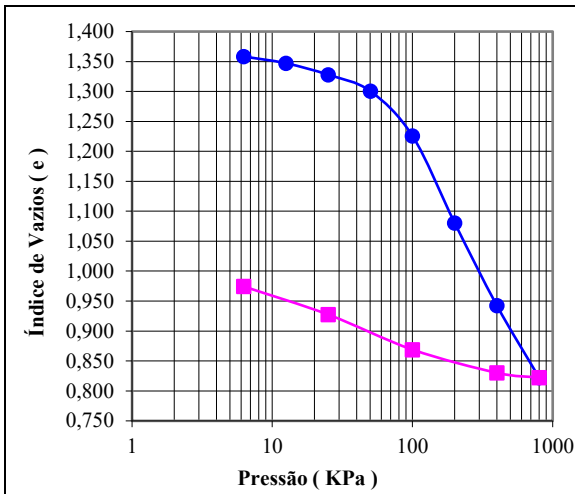
OBRA E - AM-10



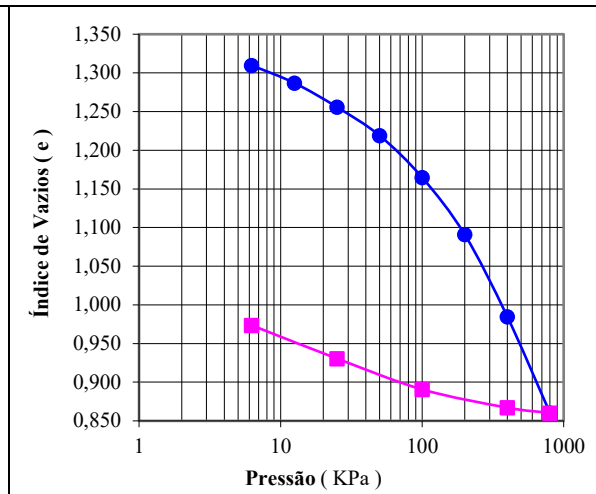
OBRA E - AM-11



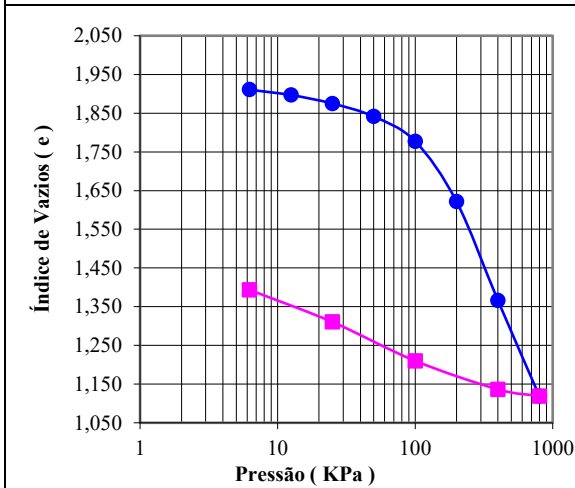
OBRA E - AM-12.1



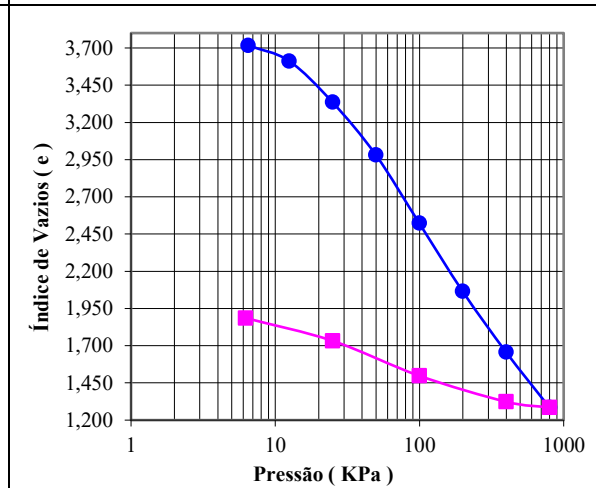
OBRA E - AM-12.2



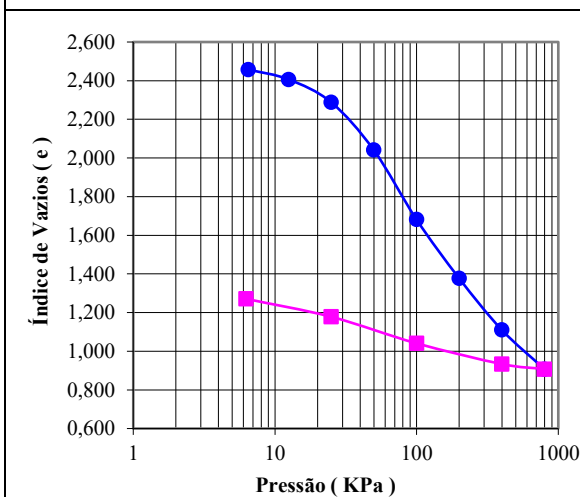
OBRA E - AM-18



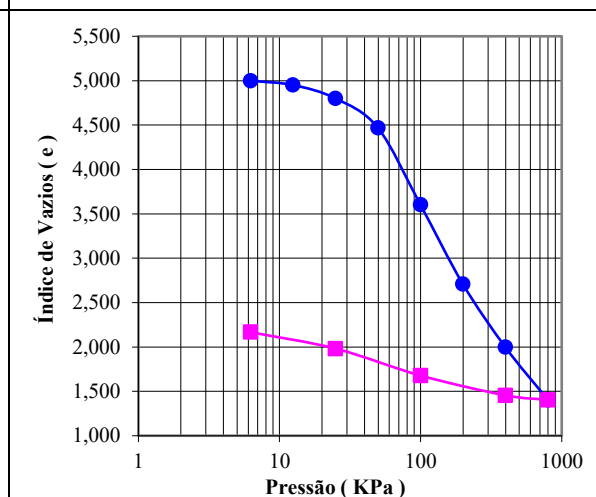
OBRA E - AM-19



OBRA F - AM-10.1



OBRA F - AM-10.2



OBRA F - AM-32.1

