

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

ANA CLARA HILZENDEGER DE ANDRADA

CALIBRAÇÃO DE PARÂMETROS-CHAVE PARA ESTIMATIVAS DE RECALQUES  
POR ADENSAMENTO USANDO ENSAIOS CPTU

Joinville

2023

ANA CLARA HILZENDEGER DE ANDRADA

CALIBRAÇÃO DE PARÂMETROS-CHAVE PARA ESTIMATIVAS DE RECALQUES  
POR ADENSAMENTO USANDO ENSAIOS CPTU

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.

Orientador: Dr. Marcelo Heidemann

Joinville

2023

ANA CLARA HILZENDEGER DE ANDRADA

CALIBRAÇÃO DE PARÂMETROS-CHAVE PARA ESTIMATIVAS DE RECALQUES  
POR ADENSAMENTO USANDO ENSAIOS CPTU

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), 08 de dezembro de 2023.

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Marcelo Heidemann  
Orientador(a)/Presidente

---

Dra. Helena Paula Nierwinski  
Membra  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Me. Jonatas Sosnoski  
Membro  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha família, amigos e professores, que me apoiaram em  
toda minha trajetória acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, que sempre foi meu alicerce e fonte de apoio, obrigada por cada encorajamento, sacrifícios e por acreditar no meu potencial. Sem a presença de vocês ao meu lado, esta conquista não teria o mesmo significado.

Aos amigos, que compartilham minhas risadas, desafios e triunfos, obrigada por serem minha segunda família. Cada momento vivido juntos tornou esta jornada educacional ainda mais significativa.

Aos professores e mentores, cuja dedicação e paixão pelo ensino moldaram meu caminho acadêmico, meus sinceros agradecimentos. Suas orientações e conhecimentos foram fundamentais para o meu crescimento e aprendizado.

## RESUMO

Para as estimativas de recalques pelo modelo de Terzaghi, é essencial utilizar os coeficientes de compressibilidade e índice de vazios do solo, parâmetros adquiridos por meio de ensaios de adensamento, os quais demandam a obtenção de amostras indeformadas de solo. Além disso, os recalques também podem ser estimados pelo modelo Janbu, onde o módulo modificador ( $m$ ) é denominado de  $m_1$  ao utilizar dados do ensaio de adensamento, e  $m_2$  que correlaciona com dados de ensaio CPTU e número modificador de módulo ( $\alpha$ ). O parâmetro  $\alpha$  pode ser calibrado a partir de um banco de dados confiável, em que  $m_2$  corresponda a  $m_1$ . Dessa forma, a análise deste trabalho consiste na calibração de  $\alpha$  para estimativas de recalques utilizando resultados de ensaio CPTU ou de caracterização física simples, tornando-se uma ferramenta complementar às campanhas de investigação geotécnica baseadas em ensaios de adensamento em laboratório. A calibração de  $\alpha$  foi conduzida por meio de correlações univariadas e multivariadas. Para a primeira, o software Excel foi utilizado para examinar ajustes para  $\alpha$  (como  $\alpha^2$  e  $1/\alpha$ ), linhas de tendência e  $R^2$ . Já para a segunda análise, o software RStudio, utilizando a linguagem R, foi empregado para avaliar a aderência dos resíduos à normalidade, multicolinearidade e heterocedasticidade. Na análise univariada, foi estudada a correlação de parâmetros de ensaio CPTU ou de caracterização simples, inicialmente sem separação por texturas e posteriormente com separação (argila orgânica e turfa, argila orgânica, argila arenosa, areia argilosa e silte argiloso). Obtendo resultados favoráveis ao utilizar a correlação entre  $\gamma_d$  e  $\alpha$ , sem separação por textura. Posteriormente, a análise seguiu de maneira multivariada, utilizando os modelos A (banco de dados original), BC (modelo A após transformação não-linear Box-Cox), B (usando variáveis *dummy*) e C (modelo B após utilização do procedimento *stepwise*). A primeira análise multivariada comprovou que as variáveis  $\gamma_n$ ,  $\gamma_d$ ,  $e$ ,  $C_c$  e  $w$  influenciam nos resultados de  $\alpha$ , corroborando os achados da análise univariada. Os modelos que melhor estimaram os valores de  $\alpha$  foram A2/BC2 e A6, e após a análise de aderência dos resíduos à normalidade, multicolinearidade e heterocedasticidade, BC2 apresentou os melhores resultados. Assim como na análise univariada, os modelos B e C indicaram que a textura não é significativa para as análises, além possuírem boa correlação com  $m_1$ , e, portanto, não foram utilizados para os demais testes. Ao final, foram plotados os valores de  $m_1$  por  $m_2$  estimados a partir do modelo definido no trabalho, obtendo bons resultados para valores de  $\alpha$ .

**Palavras-chave:** Estimativas de recalques. CPTU. Ensaio de adensamento. Número modificador de módulo.

## ABSTRACT

For estimates of settlements using the Terzaghi model, it is essential to utilize the compressibility coefficients and void ratio of the soil, parameters acquired through consolidation tests that require obtaining undisturbed soil samples. Additionally, settlements can also be estimated using the Janbu model, where the modifying modulus ( $m$ ) is denoted as  $m_1$  when using consolidation test data, and  $m_2$ , which correlates with Cone Penetration Test with pore pressure measurements (CPTU) and the modulus modifying number ( $\alpha$ ). The parameter  $\alpha$  can be calibrated from a reliable database, where  $m_2$  corresponds to  $m_1$ . Thus, the analysis in this study involves the calibration of  $\alpha$  for settlement estimates using CPTU results or simple physical characterization, becoming a complementary tool to geotechnical investigation campaigns based on laboratory consolidation tests. The calibration of  $\alpha$  was conducted through univariate and multivariate correlations. For the former, Excel software was used to examine adjustments for  $\alpha$  (such as  $\alpha^2$  and  $1/\alpha$ ), trendlines, and  $R^2$ . For the latter analysis, RStudio software, using the R language, was employed to evaluate the adherence of residuals to normality, multicollinearity, and heteroscedasticity. In the univariate analysis, the correlation of CPTU or simple characterization test parameters was studied, initially without separation by textures and later with separation (organic clay and peat, organic clay, sandy clay, clayey sand, and clayey silt). Favorable results were obtained when correlating  $\gamma_d$  and  $\alpha$  without texture separation. Subsequently, the analysis proceeded in a multivariate manner, using Models A (original database), BC (Model A after Box-Cox nonlinear transformation), B (using dummy variables), and C (Model B after stepwise procedure). The first multivariate analysis confirmed that the variables  $\gamma_n$ ,  $\gamma_d$ ,  $e$ ,  $C_c$ , and  $w$  influence the results of  $\alpha$ , corroborating the findings of the univariate analysis. The models that best estimated the values of  $\alpha$  were A2/BC2 and A6, and after assessing the adherence of residuals to normality, multicollinearity, and heteroscedasticity, BC2 showed the best results. Similar to the univariate analysis, Models B and C indicated that texture is not significant for the analyses, and they also have a good correlation with  $m_1$  and were not used for further tests. In the end, the values of  $m_1$  by estimated  $m_2$  from the model defined in the study were plotted, obtaining good results for  $\alpha$  values.

**Keywords:** Settlement estimates. CPTU. Consolidation test. Modifying module number.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da célula de adensamento.....	18
Figura 2 - Representação da curva de adensamento .....	19
Figura 3 – Procedimento gráfico para determinação da Tensão de pré-adensamento pelo método de Casagrande .....	20
Figura 4 – Determinação dos coeficientes angulares das retas $C_r$ e $C_c$ .....	21
Figura 5 - Variação linear do índice de vazios com a pressão efetiva.....	22
Figura 6 - Posição e tipos de elementos filtrantes.....	26
Figura 7 - Disposição dos dados de $q_c$ e $q_t$ .....	27
Figura 8 - Classificação de solos por tipos de comportamento .....	28
Figura 10 - Ábaco de identificação do comportamento de tipo de solos .....	29
Figura 11 – Curva teórica e experimental de poropressões medidas .....	31
Figura 12 – Esquema para determinar os valores de $m$ .....	40
Figura 13 - Distribuição das observações de $\alpha$ obtidas nesta pesquisa.....	49
Figura 14 – Correlação (a) $e-\alpha$ e $w-\alpha$ , (b) $e-\alpha^c$ e $w-\alpha^c$ , e (c) $e-1/\alpha$ e $w-1/\alpha$ .....	52
Figura 16 – Correlações entre (a) $C_c$ e teor de umidade e (b) índice de vazios e $w$ .	54
Figura 17 – Correlação entre $\alpha$ calculado e $\alpha$ estimado pelas Equações (a) 49, (b) 50 e (c) 51 .....	55
Figura 18 – Correlações entre $\gamma_d$ e $LP$ com $\alpha$ (a) argila arenosa, (b) argila orgânica / turfa, (c) argila orgânica e (d) areia argilosa e silte argiloso .....	57
Figura 19 - Correlação entre $\alpha$ calculado e $\alpha$ estimado pelas Equações (a) 52, (b) 53, (c) 54 e (d) 55.....	58
Figura 20 - Correlação entre $\alpha$ e as variáveis explicativas.....	59
Figura 21 – $\alpha$ calculado vs $\alpha$ estimado pelos modelos (a) A2, (b) A6 e (c) BC2 .....	66
Figura 22 – (a) $C_c$ calculado vs $C_c$ estimado, (b) utilizando $C_c$ calculado e (c) utilizando $C_c$ estimado .....	67
Figura 23 – $m_1$ vs $m_2$ .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de solos em função do $I_c$ .....	28
Tabela 2 - Zonas correspondentes ao tipo de comportamento dos solos .....	30
Tabela 3 - Valores típicos de número de módulo .....	33
Tabela 4 – Número modificador de módulo para diferentes tipos de solo.....	34
Tabela 5 – Disposição dos ensaios por obra.....	37
Tabela 6 – Caracterização das amostras coletadas.....	37
Tabela 7 – Correlações entre os parâmetros .....	42
Tabela 8 – Valores de $\alpha$ e demais características de interesse para cada amostra .	47
Tabela 9 – Médias e desvio-padrão .....	50
Tabela 10 – Variáveis com menores $R^2$ .....	51
Tabela 11 – Variáveis com maiores $R^2$ .....	51
Tabela 12– Correlações com maiores $R^2$ .....	56
Tabela 13 – Modelos analisados.....	61
Tabela 14 – Modelo A1 .....	62
Tabela 15 – Modelos A2, A3 e A6.....	63
Tabela 16 – Modelos A4, A5, A7 e A8 .....	63
Tabela 17 – Modelos BC2, BC3, BC4, BC5, BC6 e BC7 .....	64
Tabela 18 – p-value e VIF para os modelos A2, A6 e BC2 .....	65
Tabela 19 – Modelo C1 .....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CPT – Ensaio de cone

CPTU – Ensaio de piezocone

IRTP – *International Reference Testing Procedure*

NSPT – Resistência de ponta à percussão

OCR – razão de pré-adensamento ou *overconsolidatio ratio*

SPT – Sondagem à percussão

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\alpha$  – Número modificador de módulo
- $a$  – Razão entre área interna pela área externa da seção transversal
- $a_v$  – Grau de adensamento
- $B_q$  – Parâmetro de poropressão
- $C_c$  – Coeficiente de compressibilidade
- $C_r$  – Coeficiente de recompressão
- $C_v$  – Coeficiente de adensamento
- $C_h$  – Coeficiente de adensamento horizontal
- $D$  – Módulo de compressão edométrica
- $d_c$  – Diâmetro do cone
- $d_2$  – Diâmetro da luva
- $e$  – Índice de vazios
- $\Delta e$  – Variação de índice de vazios
- $\mathcal{E}$  – Deformação específica
- $F_r$  – Razão de atrito normalizada
- $f_s$  – Atrito lateral
- $G$  – Densidade real dos grãos
- $\gamma_n$  – Peso específico natural do solo
- $\gamma_d$  – Peso específico seco do solo
- $H$  – Espessura da camada compressível
- $h's$  – Altura reduzida da camada comprimida
- $IC$  – Índice de consistência
- $I_{cRW}$  – Classificação do solo (Robertson e Write, 1998)
- $I_c$  – Classificação do solo (Jefferies e Davies, 1993)
- $IP$  – Índice de plasticidade
- $j$  – Expoente de tensão
- $l$  – Comprimento da luva
- $LL$  – Limite de liquidez
- $LP$  – Limite de plasticidade
- $m$  – Número de módulo
- $m_1$  – Número de módulo utilizando parâmetros do ensaio de adensamento

$m_2$  – Número de módulo utilizando parâmetros do ensaio CPTU

$m_v$  – Coeficiente de variação volumétrica

$q_c$  – Resistência de ponta

$q_t$  – Resistência de ponta corrigida

$r_f$  – Razão de atrito

$\rho$  – Magnitude do recalque

$S_u$  – Resistência não drenada

$\sigma'_{v0}$  – Tensão vertical efetiva

$\sigma'_{vm}$  – Tensão de pré-adensamento

$\sigma'_r$  – Tensão de 100 kPa

$u_1$  – Poropressão medida na ponta do cone

$u_2$  – Poropressão medida na base do cone

$u_3$  – Poropressão medida na luva do cone

$w$  – Teor de umidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1.	<b>Objetivo Geral</b>	<b>16</b>
1.1.2.	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
2.1	ADENSAMENTO PRIMÁRIO	17
2.1.1	<b>Ensaio de adensamento</b>	<b>17</b>
2.1.2	<b>Estimativas de recalque por adensamento</b>	<b>23</b>
2.2	ENSAIOS CPTU	25
2.2.1	<b>Ensaio de dissipação</b>	<b>30</b>
2.3	MODELO DE JANBU PARA PREVISÃO DE RECALQUES	32
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>36</b>
3.1	COLETA DE DADOS	36
3.2	ESTIMATIVA DO PARÂMETRO-CHAVE	40
3.3	ESTUDO ESTATÍSTICO	41
3.3.1	<b>Análise univariada</b>	<b>42</b>
3.3.2	<b>Análise multivariada</b>	<b>43</b>
3.3.3	<b>Verificação do atendimento aos pressupostos estatísticos</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>47</b>
4.1	CÁLCULO DOS VALORES DO MODIFICADOR DE MÓDULO	47
4.1.1	<b>Análise univariada</b>	<b>50</b>
4.1.1.1	<u>Sem separação por textura</u>	<u>51</u>
4.1.1.2	<u>Com separação por textura</u>	<u>56</u>
4.1.2	<b>Análise multivariada</b>	<b>59</b>
4.1.2.1	<u>Sem separação por textura</u>	<u>60</u>
4.1.2.2	<u>Com separação por textura</u>	<u>68</u>
4.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS	69
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>70</b>
	REFERÊNCIAS	72

## 1 INTRODUÇÃO

Todas as obras da Engenharia Civil estão assentadas sobre o terreno, e inevitavelmente requerem considerar devidamente o comportamento do solo de fundação. A utilização de solos moles como fundação de obras implica, na maior parte das vezes, o melhoramento ou correção de suas principais características, como baixa resistência e a elevada deformabilidade (Pinto, 2006). Assim, para garantir a segurança das obras implantadas sobre o terreno é exigido que as características específicas de cada tipo de solo sejam estudadas (Fernandes, 2016).

Segundo Das (2007), quando uma camada de solo coesivo saturado é submetida a um acréscimo de tensões, o recalque elástico ocorre imediatamente, e posteriormente, a alteração do volume da argila pode continuar ocorrendo, sendo este processo denominado adensamento primário. O adensamento primário se dá na medida em que os excessos de poropressão da água gerados pelo acréscimo de carga são dissipados, e isto ocorre gradativamente.

De acordo com Pinto (2006), os recalques por adensamento são estimados a partir do modelo de Terzaghi, que tem sua validade fundamentada nas seguintes hipóteses: o solo é homogêneo e saturado, a compressão e o fluxo de água são unidimensionais; a água e as partículas sólidas são incompressíveis; o solo pode ser representado como elementos infinitesimais, apesar de ser constituído de vazios e partículas; o fluxo de água é governado pela Lei de Darcy; as propriedades do solo não variam no processo de adensamento; o índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento.

Para estimativa de recalques por adensamento são necessários os parâmetros de comportamento obtidos em ensaios edométricos, em que se simula o comportamento do solo quando comprimido axialmente sob confinamento lateral. Este ensaio, é considerado representativo nas situações em que se pode admitir deformação vertical sem deformações horizontais, e a partir dele é possível obter os coeficientes de compressibilidade, variação volumétrica e módulo de compressão edométrica (Pinto, 2006).

No entanto, este ensaio requer amostras indeformadas de solo. A qualidade das amostras depende principalmente da técnica empregada na sua amostragem, devendo ser tomadas as providências necessárias relativas à selagem, transporte,

retirada dos tubos amostradores em laboratório. Para a manutenção da sua condição natural devem ser mantidas em câmaras úmidas até a execução do ensaio, procurando minimizar o tempo de armazenamento (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 16853:2020).

Em solos arenosos altamente permeáveis, a drenagem causada pelo aumento da poropressão é concluída imediatamente. Já em solos argilosos a condutividade hidráulica é significativamente menor que a da areia, e com isso a dissipação do excesso de poropressão gerado requer um longo período. O ensaio de adensamento em areias leva minutos, em siltes horas e em argilas dias (Das, 2007).

Segundo Fellenius (2006), uma alternativa em potencial para estimativas de recalques por adensamento de forma mais rápida é o emprego do método de Janbu, baseado nas medidas de resistência de ponta corrigida ( $qt$ ) em ensaios CPTU. No entanto, para determinar o número de módulo ( $m$ ), que faz as vezes da relação  $Cc/(1+e)$ , requer a utilização de um modificador de módulo ( $\alpha$ ). Valores de referência para este parâmetro foram determinados a partir da avaliação de extensos dados de campo e laboratório (Massarsch, 1994), variando, segundo Fellenius (2006), dentro de uma faixa relativamente estreita para cada tipo de solo.

As incertezas associadas a estes parâmetros obtidos empiricamente limitam o uso do método de Janbu. Isto porque os valores do modificador de módulo são baseados na calibração limitada para testes de consolidação em argilas lacustres e marinhas normalmente consolidadas. Argilas de outros locais podem diferir por um fator de dois dos valores mostrados (Fellenius, 2006).

Nesse sentido, este trabalho busca explorar possíveis relações entre propriedades físicas e mecânicas de alguns solos sedimentares brasileiros e o valor do número modificador de módulo ( $\alpha$ ) e o número de módulo ( $m$ ). Entende-se que havendo maior certeza na determinação destes parâmetros torna-se mais segura a utilização do método de Janbu para estimativas de recalques por adensamento.

## 1.1 OBJETIVOS

Para investigar a possibilidade de estimativas de recalques por adensamento através de resultados de ensaios piezocone (CPTU), propõe-se os seguintes objetivos.

### 1.1.1. Objetivo Geral

Investigar a relação entre os parâmetros empíricos do método de estimativa de recalques por ensaio CPTU proposto por Janbu e propriedades físicas e mecânicas obtidas em laboratório para solos sedimentares brasileiros.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Coletar dados de ensaios CPTU e de adensamento em solos sedimentares;
- Calcular os valores de número modificador de módulo ( $\alpha$ ) e o número de módulo ( $m$ )
- Investigar correlações univariadas entre  $\alpha$  e  $m$  e propriedades geotécnicas (mecânicas e físicas) dos solos que compõem o banco de dados deste trabalho;
- Investigar correlações multivariadas entre  $\alpha$  e  $m$  e propriedades geotécnicas (mecânicas e físicas) dos solos que compõem o banco de dados deste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o melhor entendimento deste trabalho é importante contextualizar, ainda que de forma sucinta, os ensaios de adensamento e CPTU e o modelo Janbu para estimativas de recalques por adensamento.

### 2.1 ADENSAMENTO PRIMÁRIO

A compressibilidade dos solos está relacionada com a capacidade da redução de seu volume sob aplicação de uma carga externa. A redução do volume pode ser dada pela eliminação do ar ou água dos vazios do solo, sendo a primeira a compactação e a segunda o processo de adensamento (Pinto, 2006).

O adensamento é composto por duas parcelas sendo o primário, fenômeno de expulsão de água, na qual as poropressões geradas são dissipadas até atingirem a poropressão hidrostática. E, secundário, o fenômeno no qual o solo continua comprimindo após a total dissipação do excesso de poropressão sob tensão efetiva constante (Das, 2007).

De acordo com Pinto (2006), a teoria de adensamento de Terzaghi (1943) baseia-se nas seguintes hipóteses: o solo é homogêneo e totalmente saturado; a compressão e o fluxo de água são unidimensionais; a água e as partículas sólidas são incompressíveis, perante a compressibilidade do solo; o solo pode ser representado como elementos infinitesimais, apesar de ser constituído de vazios e partículas; o fluxo de água é governado pela Lei de Darcy; as propriedades do solo não variam no processo de adensamento; o índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento.

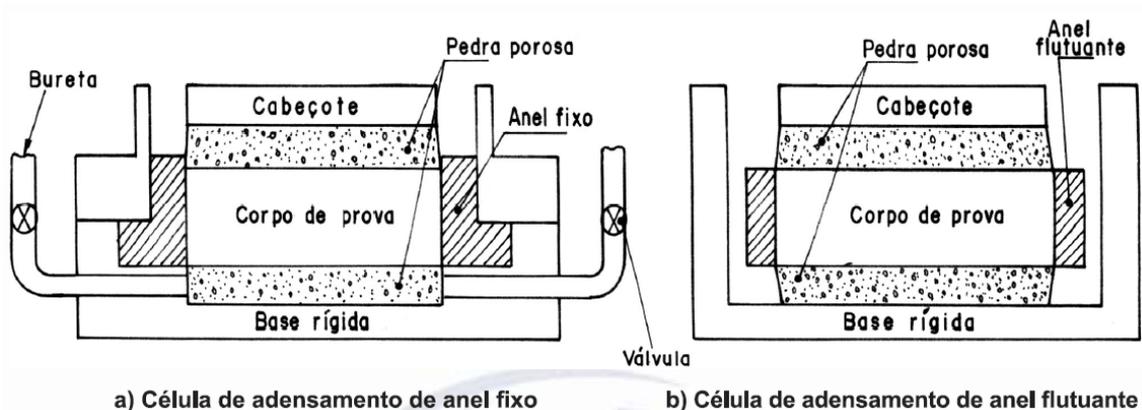
#### 2.1.1 Ensaio de adensamento

O ensaio de adensamento é regido pela ABNT NBR 16853 (2020). O principal objetivo do ensaio é avaliar o comportamento de um solo, mantido em confinamento lateral, e carregado axialmente de forma incremental, sendo a pressão mantida constante em cada incremento, até que todo o excesso de poropressão seja dissipado.

Segundo ABNT NBR 16853 (2020), para o ensaio os corpos de prova podem advir de amostras indeformadas, coletadas a partir de blocos ou por tubos amostradores de parede fina, ou amostras deformadas compactadas em laboratório. A qualidade das amostras depende principalmente da técnica empregada na sua coleta em campo, devendo ser tomadas as providências necessárias relativas à selagem, transporte e a retirada dos tubos amostradores em laboratório, para a manutenção da sua condição natural. As amostras devem ser mantidas em câmaras úmidas até a execução do ensaio, procurando minimizar o tempo de armazenamento.

As principais aparelhagens necessárias para o ensaio de adensamento consistem em um sistema de aplicação de carga (prensa de adensamento), célula e anel de adensamento. A primeira, permite a aplicação e a manutenção das cargas verticais especificadas, ao longo do período necessário. Já a segunda, é a célula de adensamento apropriada para conter o corpo de prova, proporcionando meios para aplicação de carga verticais, medida do deslocamento vertical (variação na altura do CP) e sua submersão. Esta célula consiste em uma base rígida, anel para conter a amostra de solo, pedras porosas, e um cabeçote rígido de carregamento. O anel pode ser do tipo fixo ou flutuante, o primeiro não é possível ser deslocado em relação à base rígida, já o segundo, pode ser deslocado em relação à base e é suportado pelo atrito lateral entre solo e anel, indicados na Figura 1 (ABNT NBR 16853, 2020).

Figura 1 - Representação esquemática da célula de adensamento

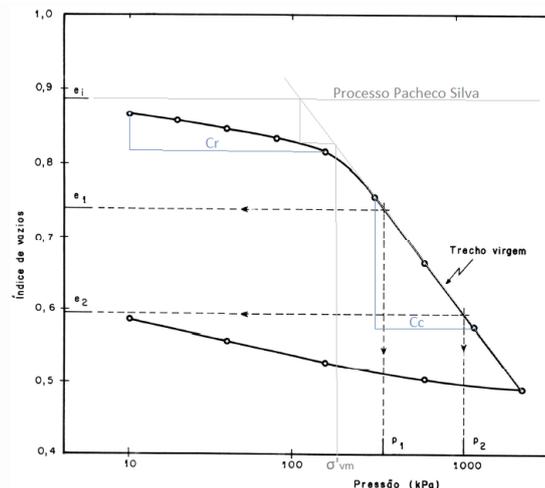


Fonte: ABNT (2020).

Para iniciar o ensaio propriamente dito, é montado o corpo de prova na célula de adensamento, entre duas pedras porosas, conforme apresentado na Figura 1. Com

o auxílio de um extensômetro, são feitas as medidas da variação de altura do CP, para os diversos estágios de carga, nos intervalos conforme indicados na normativa. Após a conclusão das leituras correspondentes aos incrementos de carga, é feito o descarregamento do corpo de prova, com leituras do extensômetro em no mínimo três estágios de descarregamento. Posteriormente à conclusão das leituras, é feita a organização dos resultados, podendo ser obtida a curva de adensamento, sendo a carga aplicada (kPa) expressa no eixo das abscissas em escala log e o índice de vazios no eixo das ordenadas em escala linear. A curva de adensamento é apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Representação da curva de adensamento



Fonte: ABNT (2020, modificada).

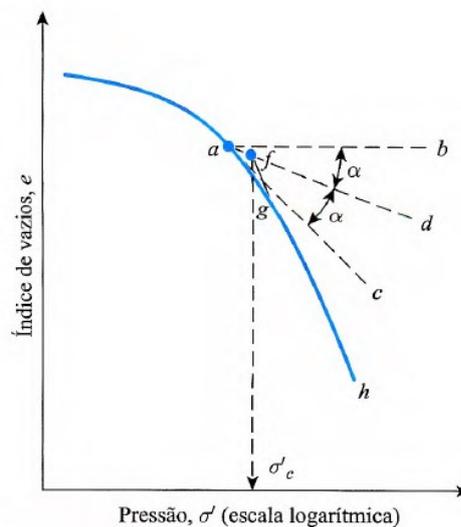
A tensão de pré-adensamento diz respeito à tensão efetiva que delimita a transição do trecho de recompressão para o trecho da reta virgem, sendo a maior tensão normal efetiva a que solo já foi submetido (Pinto, 2006). Este parâmetro influencia diretamente na magnitude dos recalques que o solo pode sofrer. Quando o corpo de prova é submetido a tensões maiores que a de pré-adensamento, a variação do índice de vazios é significativa, com isso, o trecho virgem será praticamente linear e com inclinação acentuada (Das, 2007).

Segundo a ABNT NBR 16853 (2020), é possível encontrar a tensão de pré-adensamento pelo método Pacheco Silva. Traçando uma reta horizontal a partir do índice de vazios inicial, prolongando o trecho virgem e encontrando o ponto em que as duas retas se cruzam. Após isso, é feita uma linha vertical até tocar a curva de

adensamento e posteriormente uma linha horizontal até encontrar a reta prolongada do trecho virgem. O ponto de intersecção da reta horizontal com a prolongação do trecho virgem projetado no eixo das abscissas é o ponto da tensão de pré-adensamento, demonstrado na Figura 2.

Além do método de Pacheco e Silva, é bastante tradicional o emprego do método de Casagrande (1936). Das (2007) descreve o processo gráfico necessário à obtenção da tensão de pré-adensamento por este método. A partir de uma observação visual, estabeleça um ponto “a” em que o gráfico apresente um raio mínimo de curvatura, após isso desenhe uma linha horizontal “ab”. Tangente ao ponto “a” trace a linha “ac”, posteriormente trace a linha “ad”, sendo esta a bissetriz entre “ab” e “ac”. Projete a parte reta da linha “gh” para trás obtendo assim a intersecção da linha “gh” com a bissetriz, no ponto desta intersecção projete uma linha vertical em direção ao eixo x (Tensão efetiva), este ponto é a tensão de pré-adensamento (Figura 3).

Figura 3 – Procedimento gráfico para determinação da Tensão de pré-adensamento pelo método de Casagrande

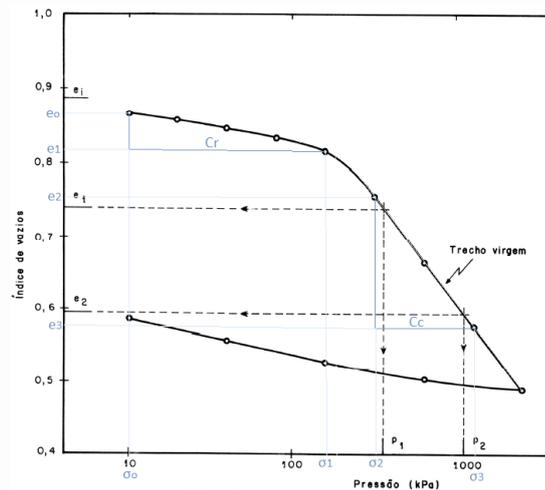


Fonte: Das (2007).

As taxas de variação do índice de vazios são, portanto, distintas para tensões inferiores e superiores à de pré-adensamento. Para tensões inferiores tal variação é descrita pelo coeficiente de recompressão ( $C_r$ ), enquanto, que para tensões maiores utiliza-se o coeficiente de compressão virgem ( $C_c$ ). Na Figura 4 é possível observar

(em azul) os coeficientes angulares das retas de recompressão ( $C_r$ ) e compressão virgem ( $C_c$ ). Os dois coeficientes podem ser calculados a partir das Equações 01 e 02 (ABNT NBR 16853, 2020).

Figura 4 – Determinação dos coeficientes angulares das retas  $C_r$  e  $C_c$



Fonte: ABNT (2020, modificada).

$$C_r = \frac{e_0 - e_1}{(\log \sigma_1 - \log \sigma_0)} \quad (01)$$

$$C_c = \frac{e_2 - e_3}{(\log \sigma_3 - \log \sigma_2)} \quad (02)$$

Segundo Caputo (1988), para determinar o coeficiente de adensamento ( $c_v$ ), utiliza-se a equação diferencial do adensamento, a qual é preciso chamar de  $dz$  a camada de argila saturada a qual é atravessada por um fluxo de água em tempo  $dt$ . De acordo com a Lei de Darcy, a água é expulsa dos vazios com uma velocidade  $v$  (Equação 03). Em que,  $k$  é o coeficiente de permeabilidade do solo e  $i$  o gradiente hidráulico.

$$v = k \cdot i = \frac{q}{A \cdot t} \quad (03)$$

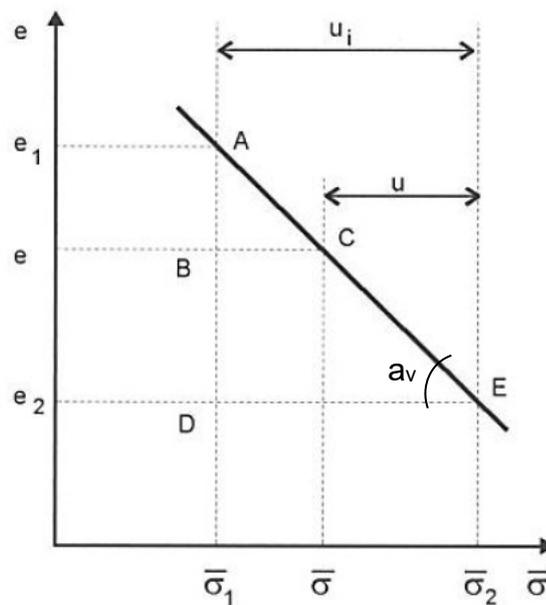
Com isso, conclui-se que  $v$  representa o volume ou a quantidade de água  $q$ , que escoar em um tempo  $t$  ao longo do prisma de seção unitária. Como a saída de

certa quantidade de água dos vazios do solo é acompanhada pela redução do seu volume, em que  $e$  é o índice de vazios do solo e  $p$  a pressão efetiva, é possível descrever a Equação 04 (Caputo, 1988):

$$a_v = -\frac{de}{dp} \quad (04)$$

Segundo Pinto (2006), o grau de adensamento  $a_v$  é a relação entre a variação do índice de vazios até o instante  $t$  e a variação total do índice de vazios devido ao carregamento conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Variação linear do índice de vazios com a pressão efetiva



Fonte: Pinto (2006).

O coeficiente de adensamento pode ser dado pela Equação 05, a qual reflete as características do solo como permeabilidade, porosidade e compressibilidade. A adoção deste coeficiente como constante constitui a hipótese de que as propriedades do solo não variam no processo de adensamento (Pinto, 2006).

$$c_v = \frac{k(1+e)}{a_v \gamma_0} \quad (05)$$

Também podem ser empregados mais dois parâmetros que expressam a rigidez apresentada pelo solo durante o ensaio, sendo eles o coeficiente de variação volumétrica  $m_v$  e módulo de compressão edométrica  $D$  apresentados nas Equações 06 e 07 (Pinto, 2006).

$$m_v = \frac{d\varepsilon_v}{d\sigma_v} \quad (06)$$

$$D = \frac{d\sigma_v}{d\varepsilon_v} \quad (07)$$

### 2.1.2 Estimativas de recalque por adensamento

Em obras envolvendo o carregamento de solos compressíveis é fundamental que se calcule o recalque total ao qual uma construção está sujeita, assim como a evolução do recalque ao longo do tempo.

Supondo que uma camada de argila com espessura  $h$ , entre duas camadas permeáveis, sofra uma variação do índice de vazios em consequência a um acréscimo de tensões sobre a mesma ( $\Delta\sigma'$ ), ao longo do tempo, esta camada terá uma espessura menor, não sendo admitida a possibilidade de expandir lateralmente (Caputo, 1988).

As Equações 08 e 09 são o cálculo da variação do índice de vazios, a primeira a partir das alturas inicial, final do corpo de prova e altura reduzida da camada comprimida ( $h's$ ), a segunda dependendo da carga aplicada e do coeficiente de permeabilidade do solo (Caputo, 1988). O parâmetro  $c$  representa os coeficientes de recompressão ( $C_r$ ) ou compressão ( $C_c$ ).

$$\Delta e = \frac{h - h_1}{h'_s} = \frac{\Delta h}{h'_s} \quad (08)$$

$$\Delta e = c \cdot \log\left(\frac{\sigma' + \Delta\sigma'}{\sigma'}\right) \quad (09)$$

A Equação 10 demonstra que a deformação específica, é dada a partir da variação da tensão aplicada, pela variação da altura do corpo de prova. Isolando o

termo  $\Delta h$  da Equação 08, é possível obter a Equação 11, a qual mostra que o recalque é a deformação específica do material multiplicado pela altura da camada compressível.

$$\varepsilon = \frac{c}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma' + \Delta\sigma'}{\sigma'}\right) \quad (10)$$

$$\Delta h = \varepsilon \cdot h'_s \therefore \rho = \varepsilon \cdot h \quad (11)$$

Consequentemente é possível estabelecer a equação do recalque total (Equação 12).

$$\rho = \frac{h \cdot c}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{\sigma' + \Delta\sigma'}{\sigma'}\right) \quad (12)$$

A Equação 12 pode ser reescrita de forma mais específica a depender dos coeficientes  $C_c$  e  $C_r$ , os quais dependem das tensões a que o solo está sendo sujeito (Equações 13,14 e 15).

$$\rho = \frac{h \cdot C_r}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_i}\right) + \frac{h \cdot C_c}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{vm}}\right) \therefore \sigma'_i < \sigma'_{vm} < \sigma'_f \quad (13)$$

$$\rho = \frac{h \cdot C_r}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_i}\right) \therefore \sigma'_f < \sigma'_{vm} \quad (14)$$

$$\rho = \frac{h \cdot C_c}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{vm}}\right) \therefore \sigma'_i = \sigma'_{vm} < \sigma'_f \quad (15)$$

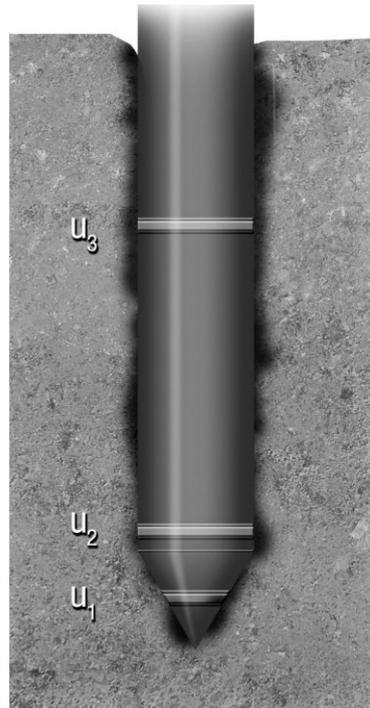
## 2.2 ENSAIOS CPTU

Os ensaios de cone (CPT – *cone penetration teste*) e piezocone (CPTU – *piezocone penetration test*), são ensaios utilizados internacionalmente para determinação do perfil estratigráfico do terreno, propriedades geotécnicas do solo, particularmente em depósitos de argilas moles e a previsão da capacidade de carga de fundações (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Este método de teste é usado para determinar a resistência ao atrito de uma luva cilíndrica localizada atrás da ponta cônica à medida que avança através de solos subterrâneos a uma taxa constante (ASTM D5778, 2012). Os principais atrativos do ensaio são os registros contínuos dos dados de resistência à penetração do solo, fornecendo informações para identificação/descrição da estratigrafia do terreno, resistência de ponta ( $q_c$ ), atrito lateral ( $f_s$ ) e poropressão na ponta, base ou na luva ( $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$ ).

A referência internacional (IRTP – *International Reference Testing Procedure*) adota como padrão a ponteira com seção transversal de 10 cm<sup>2</sup>. Sendo que o cone deve ter dimensões ( $d_c$ ) de 35,3 a 36 mm de diâmetro, com ângulo de ponta cônica em torno de  $60^\circ \pm 5^\circ$  e rugosidade da superfície tipicamente inferior a 5  $\mu\text{m}$ . O diâmetro da luva ( $d_2$ ) deve ser igual ao maior diâmetro do cone, sendo inferior a 36,1 mm e com tolerância de 0,35 mm. O comprimento da luva ( $l$ ) entre 132,5 e 135 mm, a rugosidade deve ser inferior a  $0,4 \pm 0,25 \mu\text{m}$ . O filtro conforme recomendado pela IRTP, o elemento filtrante pode ser posicionado em  $u_1$  (na ponta cônica),  $u_2$  (entre a ponta e a luva) e  $u_3$  (na luva), conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Posição e tipos de elementos filtrantes



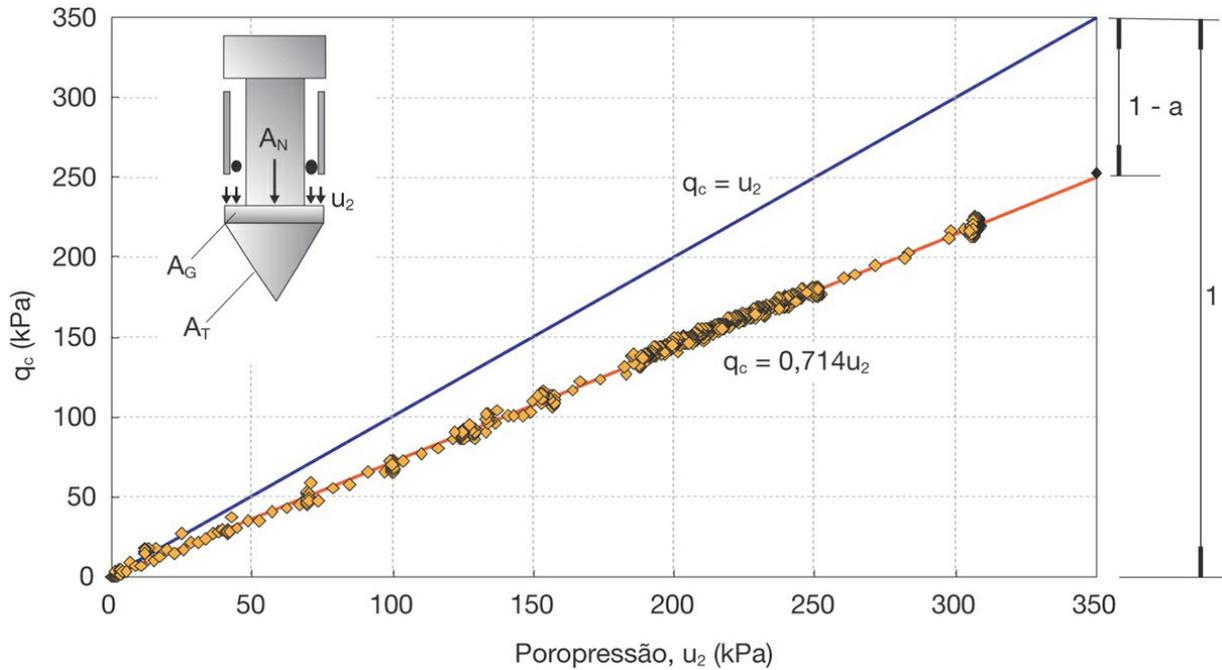
Fonte: Schnaid; Odebrecht (2012).

O ensaio CPT, conforme citado anteriormente, mede as grandezas de resistência de ponta ( $q_c$ ) e o atrito lateral ( $f_s$ ), como também, a razão de atrito ( $r_f = f_s/q_c$ ) sendo esse o primeiro parâmetro derivado do ensaio para a caracterização do solo. O ensaio CPTU permite ainda a realização de medidas de poropressão. Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), quando utilizado o ensaio de piezocone CPTU deve ser feita a correção da resistência de ponta ( $q_c$ ), que passa a ser então denominada  $q_t$ . Esta correção é feita em relação a poropressão ( $u_2$ ) atuante nas áreas desiguais do cone, para essa correção é utilizada a Equação 16 e 17 (ASTM D5778, 2012).

$$q_t = q_c + (1 - a) * u_2 \quad (16)$$

$$a = \frac{\text{Área interna da seção transversal}}{\text{Área externa da seção transversal}} \quad (17)$$

Esta correção pode ser verificada na Figura 7, com os dados de resistência de ponta ( $q_c$ ) e de resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ).

Figura 7 - Disposição dos dados de  $q_c$  e  $q_t$ 

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

Além disso, outras grandezas também derivadas do ensaio são o parâmetro de poropressão ( $B_q$ ) que auxilia na caracterização do solo (Equação 18), em que  $\sigma_{v,0}$  é a tensão total na profundidade em kPa. A resistência de ponta normalizada  $Q_t$  é dada na Equação 19 e, a razão de atrito  $F_r$  na Equação 20 (Robertson, 1990).

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (18)$$

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0} - u_0} \quad (19)$$

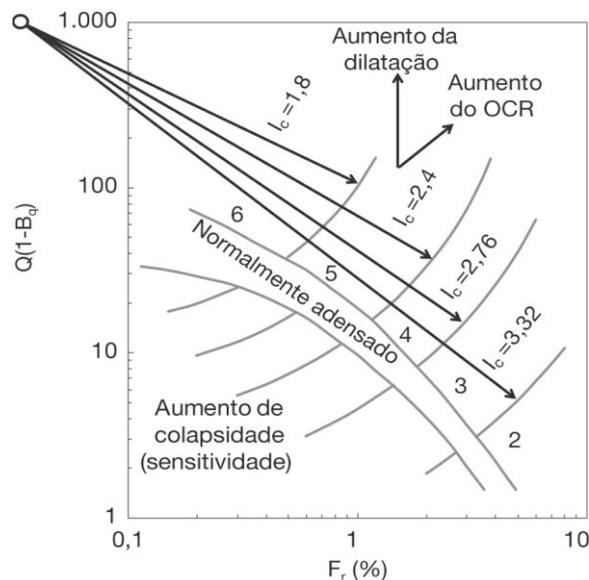
$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} 100\% \quad (20)$$

Jefferies e Davies (1993) definiram um índice de classificação do material ( $I_c$ ), apresentado na Equação 21, que permite também a identificação rápida das condições de drenagem para solicitações correntes em obras de engenharia, podendo ser considerado como drenados solos com valores de  $I_c < 1,8$  e não drenados os solos com valores de  $I_c > 2,76$  (Schnaid e Odebrecht, 2012).

$$I_c = \left( \{3 - \log(Q_t) [1 - B_q]\}^2 + \{1,5 + 1,3 \log(F_r)\}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

A partir dos valores de  $I_c$  e  $F_R$ , é possível obter a zona do material na Figura 8 e classificar o solo por tipo de comportamento, Tabela 1 (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Figura 8 - Classificação de solos por tipos de comportamento



Fonte: Jefferies e Davies (1993).

Tabela 1 – Classificação de solos em função do  $I_c$

Classificação do solo	Nº da zona	índice $I_c$	Índice $I_{cRW}$
Argilas orgânicas	2	$I_c > 3,22$	$I_{cRW} > 3,60$
Argilas	3	$2,82 < I_c < 3,22$	$2,95 < I_{cRW} < 3,60$
Misturas de siltes	4	$2,54 < I_c < 2,83$	$2,60 < I_{cRW} < 2,95$
Misturas de areias	5	$1,90 < I_c < 2,82$	$2,05 < I_{cRW} < 2,60$
Areias	6	$1,25 < I_c < 1,90$	$1,31 < I_{cRW} < 2,05$
Areias com pedregulhos	7	$I_c < 1,25$	$I_{cRW} < 1,31$
Solos sensitivos	1	NA	Solos sensitivos para a zona 1 caracterizada quando $Q_{t1} < 12 \exp(-1,4F_r)$

Fonte: Jefferies e Davies (1993).

Uma alternativa para identificação/descrição do tipo de solo é o índice proposto por Robertson e Wride (1998). O índice de classificação do material ( $I_{cRW}$ ) é

determinado a partir da Equação 22, sendo os parâmetros  $Q_{tn}$  e  $n$  descritos nas Equações 23 e 24, respectivamente.

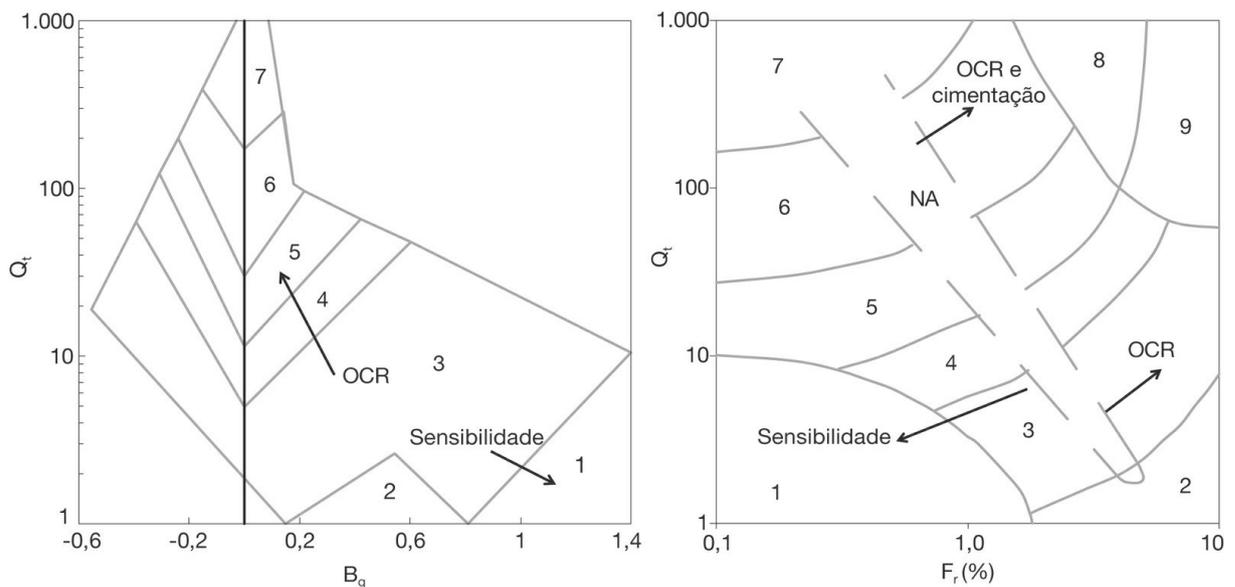
$$I_{CRW} = (\{3,47 - \log(Q_{tn})\}^2 + \{1,22 + \log(F_r)\}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

$$Q_{tn} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{atm}} \left( \frac{\sigma_{atm}}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (23)$$

$$n = 0,381I_{CRW} + 0,15 \left( \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma_{atm}} \right) - 0,15 \leq 1,0 \quad (24)$$

De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), uma das maiores críticas ao ensaio CPTU é o fato de não obter amostras para identificação e a classificação das distintas camadas do solo. Isto, no entanto, não compromete a classificação dos materiais, bastando para tal a adoção dos índices previamente reportados. Tal classificação pode ser feita ainda utilizando os ábacos construídos por Robertson (1990). Para tal, os resultados do ensaio devem ser plotados no ábaco, o qual contém nove zonas correspondentes (Tabela 2) a tipos de solos com comportamentos distintos. Estes ábacos estão apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Ábaco de identificação do comportamento de tipo de solos



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

Tabela 2 - Zonas correspondentes ao tipo de comportamento dos solos

Zona	Tipos de solos
1	solo fino sensível
2	solo orgânico e turfas
3	argilas – argilas siltosas
4	argila siltosa – silte argiloso
5	siltos arenosos – areias siltosas
6	areias limpas – areias siltosas
7	areias com pedregulhos – areias
8	areias – areias limpas
9	areias finas rígidas

Fonte: Robertson (1990).

Segundo Das (2007), é possível a partir do ensaio de CPTU correlacionar resistência ao cisalhamento não drenado  $S_u$  e  $q_t$  (Equação 25) e entre  $q_c$  e  $N_{60}$  (Equação 26).

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (25)$$

$$\frac{q_c}{p_a} = 7,64 D_{50}^{0,26} \quad (26)$$

### 2.2.1 Ensaio de dissipação

Ensaio de dissipação do excesso de poropressões gerado durante a cravação do piezocone no solo podem ser interpretados para estimativas do coeficiente de adensamento horizontal ( $c_h$ ) do solo (Schnaid e Odebrecht, 2012). Este ensaio consiste em interromper a penetração, descarregando a haste e registrando a pressão da água nos poros em função do tempo. Quando a pressão da água dos poros se torna constante, ele está medindo o valor de equilíbrio, nível piezométrico naquela profundidade (ASTM D5778, 2012).

Este ensaio é uma alternativa aos ensaios de laboratório, como o ensaio de adensamento, no qual boas estimativas dos parâmetros requerem amostras indeformada de boa qualidade (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), a solução do ensaio é concebida em duas etapas, sendo a primeira, calcular a distribuição de poropressões geradas pela penetração do cone, e a segunda, assumir essas poropressões como valores iniciais da teoria de Terzaghi, calculando a dissipação ao redor de um cone estacionário. Este processo de dissipação pode ser convenientemente expresso por meio de um fator de tempo adimensional:

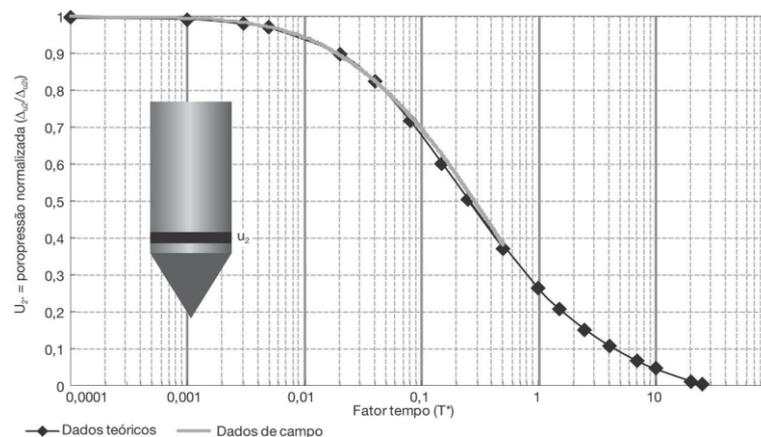
$$T^* = \frac{C_h t}{R^2 (I_r)^2} \quad (27)$$

$$C_h = \frac{T^* R^2 (I_r)^2}{t} \quad (28)$$

Em que  $R$  é o raio do piezocone,  $t$  o tempo de dissipação, normalmente adotado como  $t_{50\%}$  e  $I_r$  o índice de rigidez.

A Figura 10 apresenta uma comparação entre o resultado experimental e a solução analítica, sendo possível observar que a teoria reproduz de maneira adequada o comportamento medido, o que demonstra aplicabilidade do modelo proposto (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Figura 10 – Curva teórica e experimental de poropressões medidas



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

Os valores de  $C_h$  podem ser convertidos para  $C_v$  para fins de comparação com o ensaio de adensamento, apresentada na equação abaixo (Schnaid e Odebrecht, 2012):

$$C_v = \frac{k_v}{k_h} C_h \quad (29)$$

Em que  $k_v$  e  $k_h$  são as permeabilidades verticais e horizontais respectivamente.

### 2.3 MODELO DE JANBU PARA PREVISÃO DE RECALQUES

Proposta por Nilmar Janbu no início da década de 1960 e referenciada pelo *Canadian Foundation Engineering Manual* (CFEM, 1985), a abordagem do módulo tangente de Janbu combina os princípios de tensão-deformação linear e não linear. O método pode ser aplicado a todos os tipos de solo, sendo este método em função de dois parâmetros que são únicos a cada tipo de solo, um expoente de tensão ( $j$ ), e um número de módulo ( $m$ ) (Fellenius, 2006), utilizados na Equação 29.

$$M_t = m \sigma_r \left( \frac{\sigma'}{\sigma_r} \right)^{1-j} \quad (29)$$

Para solo sem coesão assume-se que o parâmetro  $j > 0$ , para solos grosseiros densos tem-se  $j = 1$ , já em solos arenosos ou siltosos  $j = 0,5$  e para solos coesivos  $j = 0$  (Fellenius, 2006).

O número de módulo é a taxa de variação com que o solo comprime no trecho virgem ao ser carregado, o qual pode, em tese, ser determinado por ensaios laboratoriais (adensamento oedométrico), assim como ensaios *in situ*, como o ensaio CPTU.

A

Tabela 3 mostra valores para o número de módulos, normalmente conservadores, que são típicos de vários tipos de solo, citados no *Canadian Foundation Engineering Manual* (1992). Para argilas pré-consolidadas, propõe-se o

número de módulo de recompressão ( $m_r$ ), o qual tende a ser de 8 a 12 vezes o valor do número de módulo ( $m$ ) (Fellenius, 2006).

Tabela 3 - Valores típicos de número de módulo

Tipo de solo		Número de Módulo (m)			Expoente de tensão (j)
Areia	Densa	400	-	250	0,5
	Compacta	250	-	150	
	Fofa	150	-	100	
Silte arenoso	Denso	200	-	80	0,5
	Compacto	80	-	60	
	Fofa	60	-	40	
Argila siltosa e silte argiloso	Dura e rija	60	-	20	0
	Rija e média	20	-	10	
	mole	10	-	5	
Argilas moles e argilas orgânicas		20	-	5	0
Turfas		5	-	1	0

Fonte: Fellenius (2006).

A avaliação de recalques pelo método Janbu segue proposta similar à de adensamento primário de Terzaghi, a qual compara as tensões aplicadas com o histórico de tensões. Como em solos coesivos  $j$  pode ser considerado igual a zero, a deformação vertical pode ser calculada pela Equação 30 em solos pré-adensados, conforme a Equação 31 em solos normalmente adensados e de acordo com a Equação 32 em materiais em que as tensões não ultrapassam a tensão de pré-adensamento.

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{m_r}\right) \ln\left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}}\right) + \left(\frac{1}{m}\right) \ln\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{vm}}\right) \quad (30)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{m}\right) \ln\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{v0}}\right) \quad (31)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{m_r}\right) \ln\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{v0}}\right) \quad (32)$$

Segundo Fellenius (2006), a grande vantagem da utilização do modelo Janbu é a necessidade de estabelecer apenas um parâmetro, enquanto no método convencional é preciso utilizar os valores de  $e$ ,  $C_c$  e  $C_r$  da mesma amostra. Para isto, existe uma correlação entre os parâmetros obtidos no ensaio de adensamento e o

número de módulo ( $m$ ) proposto por Janbu. Denominado  $m_1$ , por se referir ao parâmetro  $m$  obtido por meio de ensaios de laboratório.

$$m_1 = \ln 10 \frac{1 + e_0}{C_c} = \frac{2,3(1 + e_0)}{C_c} \quad (33)$$

Já Massarch (1994) propôs uma relação semi-empírica (Equação 34) entre a resistência de ponta corrigida do ensaio CPTU e o número de módulo  $m$ . Assim, seria possível, em tese, estimar recalques por adensamento a partir do ensaio de campo. Nota-se, no entanto, que à equação é adicionado um número modificador de módulo ( $\alpha$ ). Este valor tem natureza fundamentalmente empírica, tendo sido determinado a partir de extensos dados de laboratório. O número de módulo  $m$  é denominado  $m_2$ , para diferenciar de  $m_1$ , o índice 2 na equação é usado para  $m$  obtido via CPTU. Massarch et al (1997) propuseram os valores para  $\alpha$  apresentados na Tabela 4.

$$m_2 = \alpha \left( \frac{q_t}{\sigma_r'} \right)^{0,5} \quad (34)$$

Tabela 4 – Número modificador de módulo para diferentes tipos de solo

Tipo de solo	Número modificador de módulo ( $\alpha$ )
Argila mole	3
Argila rijá	5
Silte orgânico mole	7
Silte fofo	12
Silte compacto	15
Silte denso	20
Areia siltosa fofo	20
Areia fofo	22
Areia compacta	28
Areia densa	35
Pedregulho fofo	35
Pedregulho denso	45

Fonte: Massarsch et al (1997).

Fellenius (2006) apresenta a Equação 35 para o cálculo do parâmetro  $m$ , a qual assim como a Equação 34 apresentada por Massarch (1994), baseia-se em médias de  $q_t$  obtidas em ensaios de campo do tipo CPTU. O termo  $\sigma_r'$  nas equações refere-se a uma tensão de referência, provavelmente adotada pelos autores como

forma de normalizar os dados, que deve ser assumida como 100 kPa. Cabe salientar que a equação da forma como está posta é válida apenas para solos coesivos, excluindo-se, portanto, areias e siltes grossos.

$$m_2 = \alpha \left( \frac{q_t}{(\sigma'_r \sigma'_v)^{0,5}} \right)^{0,5} \quad (35)$$

Assim, o recalque pode ser estimado a partir da Equação 11, sendo a deformação específica ( $\epsilon$ ) calculada a partir das Equações 30, 31 ou 32, em função do número de módulo  $m$ . Com isso as estimativas de recalque podem ser feitas a partir das Equações 36 e 37, utilizando dados do ensaio de adensamento e do ensaio CPTU, respectivamente.

$$\rho = h. \left[ \left( \frac{C_r}{2,3(1 + e_0)} \right) \log \left( \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} \right) + \left( \frac{C_c}{2,3(1 + e_0)} \right) \log \left( \frac{\sigma'_f}{\sigma'_{vm}} \right) \right] \quad (36)$$

$$\rho = h. \frac{1}{\alpha \left( \frac{q_t}{(\sigma'_r \sigma'_v)^{0,5}} \right)^{0,5}} \log \left( \frac{\sigma'_f}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (37)$$

Verifica-se, portanto, que o parâmetro  $\alpha$  deve ser tomado de um banco de dados confiável, de forma que  $m_2$  (ensaio CPTU) corresponda a  $m_1$ . Entende-se como confiável um conjunto de ensaios executados estritamente conforme a norma, não sendo o conceito de confiabilidade *strictu sensu* abordado neste trabalho.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho é composta por três etapas principais, sendo elas, (i) coleta dos dados, (ii) estimativa do parâmetro-chave e (iii) estudo estatístico dos resultados obtidos.

#### 3.1 COLETA DE DADOS

Este trabalho é continuidade do trabalho de Scariot (2022). Desta forma, empresta do referido trabalho o banco de dados, tendo sido feita a adição de dados de mais cinco obras. A seleção e filtragem dos parâmetros seguiu os mesmos critérios estipulados no trabalho de referência. Foram coletados dados de campanhas experimentais compostas por ensaios CPTU e adensamento, executados em solos finos (turfas, argilas, argilas siltosas e arenosas e siltes argilosos). Ao todo, conta-se com 40 observações no banco de dados, e para cada uma são conhecidas cerca de 15 propriedades físicas/mecânicas do material.

Das áreas investigadas, 72% estão localizadas no estado de Santa Catarina, e as demais em áreas de depósitos sedimentares com extenso histórico de investigação, como Rio Grande (RS), Rio de Janeiro (RJ) e Camaragibe (PE).

Na Tabela 5 é apresentada a disposição do local das obras, número de amostras, como também os dados de base para o estudo. Já a Tabela 6, apresenta a caracterização das amostras coletadas, de acordo com os relatórios de cada caso.

Tabela 5 – Disposição dos ensaios por obra

Local	Número de amostras para adensamento	Número de verticais de CPTU
Joinville (SC) – Obra A	5	5
Joinville (SC) – Obra B	3	3
Biguaçu (SC) – Obra C	5	3
São José (SC) – Obra D	2	2
Navegantes (SC) – Obra E	6	5
Camaraçibe (PE) – Obra F	4	2
Joinville (SC) – Obra G	2	2
Itajaí (SC) – Obra H	5	4
Rio Grande (RS) – Obra I	3	1
Rio de Janeiro (RJ) – Obra J	1	1
Camboriú (SC) – Obra K	4	2

Fonte: Autoral (2023).

Tabela 6 – Caracterização das amostras coletadas

OBRA	CPTU	AMOSTRA	Profundidade da coleta (m)	Classificação da amostra	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
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
C	1	AM-01(A)	5,00 a 6,60	Argila cinza escura (presença de matéria orgânica)	1,42
	3	AM-03(A)	2,45 a 3,00	Argila variegada (cinza escura) com mica (presença de matéria orgânica)	1,53
		AM-03(B)	6,00 a 6,50	Argila cinza escura com mica (presença de matéria orgânica)	1,42
	4	AM-04(A)	2,40 a 3,00	Argila variegada (amarela) com mica (presença de matéria orgânica)	1,57
		AM-04(B)	4,40 a 5,00	Argila arenosa cinza escura (lentes arenosas)	1,61

OBRA	CPTU	AMOSTRA	Profundidade da coleta (m)	Classificação da amostra	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
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-10.1	3,00 a 3,60	Silte argiloso cinza escuro com mica (presença de conchas marinhas)	1,46
	11	AM-11.1	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-18.1	3,90 a 4,35	Argila arenosa cinza escura (presença de conchas marinhas)	1,66
	19	AM-19.1	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)
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)	1,1
		AM-32.2	11,00 a 11,50	Argila orgânica cinza escura	1,52
G	3	AM-03	2,00 a 2,58	Areia siltosa cinza escura (presença de matéria orgânica)	1,72
	4	AM-04	3,00 a 3,58	Areia siltosa cinza escura (presença de matéria orgânica)	1,75
H	3	AM-03	1,00 a 1,50	Argila pouco arenosa amarela	1,67
	4	AM-04	2,00 a 2,50	Argila orgânica preta	1,22
	5	AM-05(A)	1,70 a 2,20	Argila arenosa cinza escura (presença de matéria orgânica)	1,51
		AM-05(B)	4,70 a 5,20	Argila arenosa cinza escura (presença de conchas marinhas)	1,8
	27	AM-27	2,90 a 3,40	Argila arenosa cinza clara	1,82
I	1	AM-01	5,00 a 5,44	Areia argilosa (presença de conchas)	1,94
		AM-02	11,00 a 11,58	Argila siltosa (presença de conchas)	1,44
		AM-03	13,00 a 13,58	Areia argilosa (lentes de areia)	1,59
J	1	AM-01	10,50 a 11,10	Argila cinza escuro (presença de conchas marinhas)	1,4
K	3	AM-01	2,00 a 2,56	Argila siltosa pouco arenosa cinza	1,45

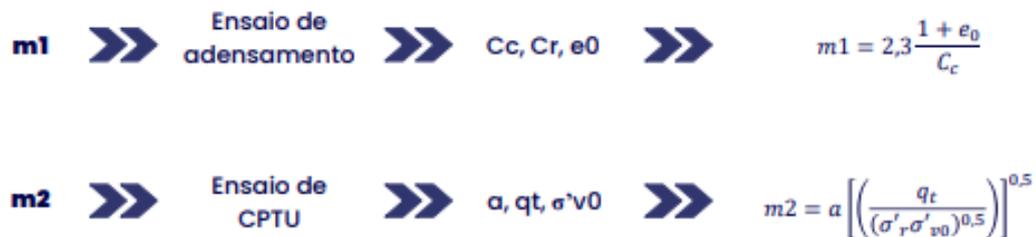
<b>OBRA</b>	<b>CPTU</b>	<b>AMOSTRA</b>	<b>Profundidade da coleta (m)</b>	<b>Classificação da amostra</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
		AM-02	2,90 a 3,50	Silte argiloso pouco arenoso cinza (presença de matéria orgânica) com mica	1,37
		AM-03	6,00 a 6,60	Silte argiloso pouco arenoso cinza (presença de matéria orgânica)	1,34
	4	AM-04	7,00 a 7,60	Silte argiloso pouco arenoso variegado (cinza) (presença de matéria orgânica)	1,18

Fonte: Autoral (2023).

### 3.2 ESTIMATIVA DO PARÂMETRO-CHAVE

A primeira análise proposta neste trabalho foi a comparação do número de módulo ( $m_1$ ) calculado a partir da Equação 35, o qual depende do índice de vazios ( $e_0$ ) e coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ) das amostras obtidas no ensaio de adensamento, com a Equação 35, que fornece um valor de  $m_2$ , em função de medidas obtidas no ensaio CPTU (mediana dos valores de  $q_t$ ), e das tensões efetivas radiais e verticais atuantes em uma dada profundidade na massa de solo ( $\sigma'_r$  e  $\sigma'_{v0}$ , respectivamente). A Figura 11 esquematiza a proposta descrita. Como neste trabalho a proposta é analisar solos finos, o fator  $j$  apresentado na Equação 29 será desconsiderado nas análises, ou seja,  $j=0$ , já que a maior parte dos materiais constantes no banco de dados desta pesquisa, quando não puramente argilosos, tem em sua composição teores significativos de argila.

Figura 11 – Esquema para determinar os valores de  $m$



Fonte: Scariot (2022).

Assim, partindo-se do pressuposto de que os valores de  $m$  obtidos via ensaios de campo e laboratório devem ser os mesmos, já que representam a mesma grandeza, ao se igualar as equações mostradas na Figura 11, é possível determinar o valor do número modificador de módulo ( $\alpha$ ), que satisfaça a igualdade. A Equação 39 resume a proposta.

$$\frac{2,3(1 + e_0)}{C_c} = \alpha \left( \frac{q_t}{(\sigma'_r \sigma'_v)^{0,5}} \right)^{0,5} \quad (38)$$

$$\alpha = \frac{2,3(1 + e_0)}{C_c} \frac{1}{\left(\frac{q_t}{(\sigma'_r \sigma'_v)^{0,5}}\right)^{0,5}} \quad (39)$$

O modificador de módulo serve para associar a previsão de recalques pelo método convencional, relacionado a  $m_1$ , com o método baseado nos ensaios CPTU. Verifica-se, portanto, que os proponentes do método consideram que a previsão do número de módulo não pode ser adequadamente feita apenas com base nos dados de  $q_t$ , sendo o  $q_t$  a mediana dos valores da camada de estudo. Assim, parece adequado considerar que o número modificador do módulo carrega características físicas e mecânicas do solo.

O conjunto de valores de  $m$  e  $\alpha$  obtidos foi então correlacionado com propriedades físicas e mecânicas dos solos que compõem o banco de dados, como: limite de liquidez ( $LL$ ), limite de plasticidade ( $LP$ ), índice de plasticidade ( $IP$ ) e índice de consistência ( $IC$ ), índice de vazios ( $e$ ), coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ), peso específico real dos grãos ( $G$ ), peso específico aparente natural ( $\gamma_n$ ) e seco ( $\gamma_d$ ) e teor de umidade ( $w$ ), tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) e razão de sobre-adensamento ( $OCR$ ). Além disso, são comparados com grandezas relacionadas ao estado de tensões prévias e concomitantes aos ensaios CPTU tais quais tensão efetiva vertical ( $\sigma'_{vo}$ ), resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ), atrito lateral ( $f_s$ ) e razão de atrito ( $R_f$ ). Cabe destacar que  $LL$  e  $LP$  não são conhecidos para todas as observações do banco de dados, o que também inviabiliza o cálculo de  $IP$  e  $IC$ .

Analisar estas correlações é o escopo da terceira etapa da metodologia.

### 3.3 ESTUDO ESTATÍSTICO

O estudo estatístico pode ser subdividido em duas etapas: análises univariadas e análises multivariadas. Na primeira etapa fez-se a avaliação das correlações da variável  $\alpha$ , individualmente, com aquelas usadas na caracterização físico-mecânica dos solos. Já as análises multivariadas buscaram explorar correlações entre  $\alpha$  e mais de uma variável explicativa (Tabela 7).

Tabela 7 – Correlações entre os parâmetros

Correlações entre os parâmetros:																
	LL	LP	IP	IC	e	Cc	G	$\gamma_n$	$\gamma_d$	w	$\sigma_{v,m}$	OCR	$\sigma_{v,0}$	$q_t$	$f_s$	Rf
$\alpha$																

Fonte: Autoral (2023).

Naturalmente que correlações da variável  $\alpha$  com algumas daquelas postas anteriormente devem ser interpretadas com cautela porque as mesmas foram usadas para o cálculo do próprio  $\alpha$ , como por exemplo  $C_c$ ,  $e_0$  e  $q_t$ . Por outro lado, examinar tais correlações servem para o entendimento e identificação do peso destas na composição do parâmetro  $\alpha$ .

### 3.3.1 Análise univariada

Na etapa de análises univariadas fez-se o uso do software Excel para determinar as correlações entre duas variáveis. Tais correlações são descritas por meio de modelos pré-definidos no software, tipicamente lineares, potência, exponenciais ou logarítmicos. O parâmetro adotado para avaliar a qualidade da correlação foi o  $R^2$ , que consiste em uma forma intuitiva de avaliar a proporção de variabilidade da resposta que é devidamente explicada por meio das variáveis independentes (Chiode, 2021). O  $R^2$  pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} = 1 - \frac{SQE}{SQT} \therefore 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (40)$$

Sendo que: SQT é a soma dos quadrados total, que denota a variação entre as observações; SQE é a soma dos quadrados dos resíduos; SQR é a soma dos quadrados da regressão. Quanto maior o valor de SQR (variável explicativa), maior a capacidade do modelo tem de explicar a resposta de interesse (Chiode, 2021).

Como forma de buscar melhorar os ajustes encontrados, foram testadas tais correlações também com valores de  $\alpha$  sujeitos a transformações do tipo potência e assíntota, as quais são expressas pelas Equações 41 e 42, respectivamente.

$$\alpha_{pot} = \alpha^c \quad (41)$$

$$\alpha_{ass} = \frac{1}{\alpha} \quad (42)$$

A qualidade dos ajustes obtidos foi então comparada com a média obtida para as variáveis  $\alpha$  e  $m$  e respectivos desvios padrão. Desta forma buscou-se avaliar a relevância em se utilizar uma função para previsão de  $\alpha$ , ao invés de simplesmente adotar-se o valor médio obtido do banco de dados.

Fellenius (2006) propõe que o valor de  $\alpha$  seja definido em função da textura do solo. Por isso, em um segundo momento adotou-se a mesma abordagem já descrita, mas com o particionamento do banco de dados em função da textura dos solos que o compõem. Assim, fez-se a divisão do banco de dados em subgrupos contendo dados agrupados da seguinte forma:

- Argilas arenosas;
- Argilas orgânicas;
- Argilas orgânicas e turfás;
- Areias e siltes argilosos.

Como o grupo de turfás possuía poucos dados, foi analisado também esta textura em conjunto com as argilas orgânicas, para verificar como seria o comportamento deste grupo.

Os resultados de  $R^2$  foram então comparados aos obtidos para o banco de dados sem particionamento, para verificar se o tipo de solo (textura) tem relevância sobre a definição do parâmetro  $\alpha$ .

### 3.3.2 Análise multivariada

A análise multivariada busca determinar modelos com múltiplas variáveis dependentes. A ferramenta escolhida foi o software RStudio, que utiliza a linguagem R para a análise de dados.

Inicialmente fez-se um estudo dos coeficientes de correlação existentes entre todas as variáveis que compõem o banco de dados, o que é similar à etapa anterior

da pesquisa (análises univariadas), mas aqui, sem buscar-se estabelecer modelos nesse sentido. Isto foi feito por meio da função “correlation”.

A função “lm” foi empregada para determinação dos modelos lineares multivariados. Como resultado o software fornece os coeficientes para construção da equação, bem como os valores de resíduo, valores da estatística t e a comparação destes com o valor t para um nível de confiança de 95%. Desta forma é possível avaliar a significância estatística de cada variável para o modelo testado. Tem-se ainda a indicação do erro padrão para os n graus de liberdade adotados e os valores de  $R^2$  e p-value para o modelo considerando um índice de confiança de 95%.

O modelo contendo todas as variáveis foi submetido ao procedimento *stepwise*. A técnica “stepwise” (função step do pacote stats) visa eliminar do modelo as variáveis que se mostrem pouco representativas considerando uma significância de 5% ( $k = 3.841459$ ), considerando a estatística t. Com isso é possível filtrar aquelas variáveis que se mostram estatisticamente representativas.

Posteriormente, foram gerados modelos para combinações de parâmetros que poderiam ser facilmente e naturalmente obtidos em campanhas de investigação de campo, os quais *qt, fs, Rf, w, G, yn ou yd, LL, LP e IP*.

Considera-se ainda que, caso o índice de vazios se mostrar uma variável com elevada capacidade de predição, seria simples uma estimativa do índice de vazios a partir de *G* e *w*, assumindo-se o solo saturado, o que é uma hipótese válida para essa pesquisa, dadas as áreas investigadas. Nesse sentido pode-se assumir que:

$$G \cdot w = e \cdot \gamma_w \quad (43)$$

Outra série de modelos foi construída a partir da não linearização das variáveis dependentes. A transformação não-linear de Box-Cox (Box e Cox, 1964) foi aplicada às variáveis dependentes utilizando a função `powerTransform()` do pacote `car`. Esta função busca estimar o melhor valor de  $\lambda$  para ajustar os dados aos modelos. Assim, a variável dependente transformada é dada pela Equação 44.

$$y_{b-c} = \frac{(y^\lambda - 1)}{\lambda} \quad (44)$$

### 3.3.3 Verificação do atendimento aos pressupostos estatísticos

Para os modelos multivariados com melhor performance foram avaliadas a aderência dos resíduos do modelo à normalidade, a ocorrência de multicolinearidade e de heterocedasticidade.

A aderência dos resíduos do modelo à normalidade foi analisada a partir do teste de Shapiro-Francia (Shapiro e Francia, 1972). Quando os resíduos do modelo não seguem uma distribuição normal, toma-se tal situação como indício de que o modelo escolhido não é adequado. O teste assume duas hipóteses: a hipótese nula ( $H_0$ ) pressupõe que os resíduos aderem à normalidade, e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) sugerem que os resíduos não seguem uma distribuição normal. Os testes foram executados com uso da função “sf.test” contida no pacote nortest. Este modelo fornece o p-value, ou probabilidade de significância. Quando p-value é inferior a 0,05 têm-se evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula, do contrário pode-se considerar os resíduos aderentes à normalidade.

A multicolinearidade se caracteriza pela ocorrência de correlações muito elevadas entre variáveis explicativas (Fávero e Belfiore, 2021). Um diagnóstico altamente positivo eleva o erro padrão dos coeficientes, devido à variância, tornando-os instáveis (Soares, 2021). Embora a existência de altas correlações entre variáveis explicativas não gere, necessariamente, estimadores ruins ou fracos (Gujarati, 2011), sua identificação pode expor eventuais redundâncias cometidas na campanha experimental. O diagnóstico de multicolinearidade foi feito a partir da proposta de Vasconcellos e Alves (2000), com base no cálculo das estatísticas Tolerância e “Variance Inflation Factor” [VIF], implementada no pacote “olsrr” por meio da função “ols\_vif\_tol”. Conforme a literatura, se o VIF for igual a 1, não existe multicolinearidade, e caso seja maior as variáveis podem estar correlacionadas. Minitab (2019) aponta que quando o VIF atinge valores da ordem de 10 os coeficientes de regressão estarão mal estimados devido à multicolinearidade.

Segundo Soares (2021), a heterocedasticidade ocorre quando a dispersão da variância ao longo da variável explicativa é heterogênea, não constante, e que quando a variância do erro se altera de acordo com as observações da variável explicativa. Isso pode ocorrer devido a uma deficiência na especificação do modelo, quando se omite uma ou mais variáveis importantes. Isto gera estimadores ineficientes, variância má estimada e intervalos de confiança não válidos. Neste trabalho o diagnóstico de

heterocedasticidade foi feito por meio do teste de Breusch-Pagan, descrito em Fávero e Belfiore (2021), que utiliza como hipótese nula erros homocedásticos, com a variância sendo constante com os termos de erro. A hipótese alternativa está associada a erros heterocedásticos, com os termos de erro se apresentando como função de uma ou mais variáveis explicativas. Assim, quando o p-value é maior que 0,05 assume-se válida a hipótese nula. O teste foi executado também por meio do pacote “olsrr” usando-se a função `ols_test_breusch_pagan`.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os valores do parâmetro-chave calculados para cada amostra, e as correlações deste com as variáveis de maneira uni e multivariada, a fim de encontrar equações com bom ajuste para utilizar o método de estimativas de recalques de Janbu a partir do ensaio CPTU, ou por meio de dados mensuráveis em simples ensaios de caracterização física.

### 4.1 CÁLCULO DOS VALORES DO MODIFICADOR DE MÓDULO

Os valores de  $\alpha$  são apresentados na Tabela 8, o qual foi calculado utilizando as medianas dos parâmetros do ensaio CPTU, e os dados obtidos no ensaio de adensamento.

Tabela 8 – Valores de  $\alpha$  e demais características de interesse para cada amostra

OBRA	CPTU	AMOSTRA	e	C <sub>c</sub>	M <sub>1</sub>	qt <sub>mediana</sub> (kPa)	$\sigma'_{vo}$ (kPa)	M <sub>2</sub>	$\alpha$
A	1	AM-01	1,59	0,29	20,54	264,92	17,18	2,528	8,125
	5	AM-05	0,96	0,33	13,66	347,42	10,1	3,306	4,132
	6	AM-06	4,48	1,81	6,96	143,90	10,63	2,101	3,315
	7	AM-07	3,07	1,12	8,36	327,82	22,89	2,618	3,193
	8	AM-08	0,86	0,2	21,39	246,11	16,57	2,459	8,699
B	1	AM-01	1,62	0,69	8,73	455,39	46,76	2,581	3,384
	2	AM-02	1,34	0,47	11,45	274,64	51,77	1,954	5,861
	4	AM-04	1,3	0,38	13,92	345,09	52,46	2,183	6,378
C	1	AM-01(A)	2,62	1,14	7,30	310,50	35,26	2,287	3,194
	3	AM-03(A)	1,91	0,66	10,14	491,22	23,31	3,190	3,179
		AM-03(B)	2,49	1,1	7,30	299,89	41,85	2,153	3,389
	4	AM-04(A)	1,87	0,64	10,31	339,16	30,39	2,480	4,158
		AM-04(B)	1,62	0,62	9,72	372,82	43,67	2,375	4,092

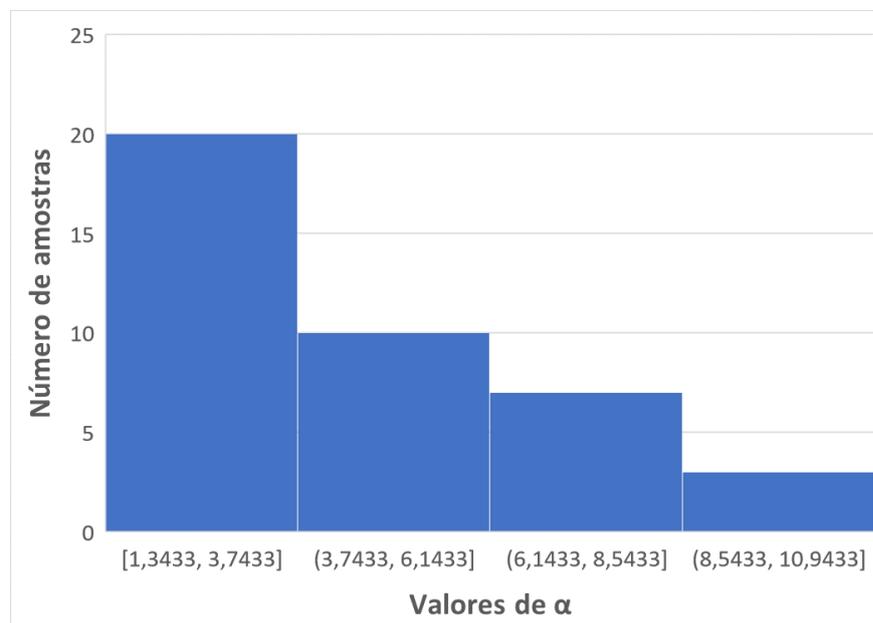
OBRA	CPTU	AMOSTRA	e	C <sub>c</sub>	M <sub>1</sub>	qt <sub>mediana</sub> (kPa)	σ' <sub>vo</sub> (kPa)	M <sub>2</sub>	α
D	1	AM-01	1,19	0,28	17,99	1085,57	36,3	4,245	4,238
	6	AM-06	1,63	0,24	25,20	1034,32	16,74	5,028	5,013
E	10	AM-10.1	2,31	1,52	5,01	432,95	45,18	2,538	1,973
	11	AM-11.1	1,17	0,27	18,49	387,42	67,23	2,174	8,504
	12	AM-12.1	1,81	0,63	10,26	330,61	57,06	2,092	4,904
		AM-12.2	1,38	0,47	11,65	337,03	74,37	1,977	5,891
	18	AM-18.1	1,33	0,38	14,10	360,11	52,19	2,233	6,317
	19	AM-19.1	1,93	0,84	8,02	669,67	55,2	3,002	2,672
	F	10	AM-10.1	3,76	1,47	7,45	228,03	21,03	2,230
AM-10.2			2,49	1,1	7,30	304,35	34,9	2,270	3,215
32		AM-32.1	5,03	2,74	5,06	382,28	7,25	3,768	1,343
		AM-32.2	2,27	0,94	8,00	357,77	17,6	2,920	2,740
G	3	AM-03	1,18	0,39	12,86	220,23	20,58	2,203	5,835
	4	AM-04	1,07	0,32	14,88	270,85	26,85	2,286	6,508
H	3	AM-03	1,62	0,44	13,70	170,35	12,05	2,215	6,182
		4	AM-04	4,71	2,35	5,59	191,09	7,5	2,642
	5	AM-05(A)	1,71	0,82	7,60	276,52	11,22	2,873	2,646
		AM-05(B)	1,05	0,34	13,87	209,93	33,77	1,901	7,296
	27	AM-27	0,99	0,28	16,35	140,26	27,88	1,630	10,029
I	1	AM-01	0,76	0,125	32,38	825,76	57,14	3,305	9,798
		AM-02	2,39	1,382	5,64	1308,92	84,15	3,777	1,494
		AM-03	1,7	0,739	8,40	1365,14	95,95	3,733	2,251
J	1	AM-01	3,04	1,46	6,36	1112,95	56,4	3,850	1,653
K	3	AM-01	2,17	0,78	9,35	211,97	20,52	2,163	4,321
		AM-02	2,39	0,98	7,96	314,91	24,27	2,528	3,147
	4	AM-03	3,19	1,08	8,92	353,54	25,44	2,648	3,370

OBRA	CPTU	AMOSTRA	e	C <sub>c</sub>	M <sub>1</sub>	qt <sub>mediana</sub> (kPa)	σ' <sub>vo</sub> (kPa)	M <sub>2</sub>	α
		AM-04	5,48	3,32	4,49	482,96	27,24	3,042	1,476

Fonte: Autoral (2023).

Do conjunto dos valores de  $\alpha$  fez-se o cálculo da média e do desvio padrão. Tem-se um valor médio da ordem de 4,48 e desvio padrão de 2,33. A Figura 12 apresenta um histograma com a distribuição dos valores de  $\alpha$  obtidos.

Figura 12 - Distribuição das observações de  $\alpha$  obtidas nesta pesquisa.



Fonte: Autoral (2023).

Observa-se que a maior parte das observações se encontra contida entre 1,34 e 3,74. Os máximos valores são da ordem de 10,94. Ao se comparar tais dados aos reportados por Massarsch et al (1997) fica evidente que a dispersão dos valores de  $\alpha$  é coerente com o apresentado por aqueles autores, mas que neste trabalho foram encontradas também observações cerca de 50% menores que o valor médio proposto para argilas moles pelos referidos autores. Os mais altos valores de  $\alpha$  são da ordem de 10,94, inferiores portanto aos propostos para siltes fofos na literatura.

Posteriormente foi feita a separação das amostras por texturas, utilizando principalmente os relatórios dos ensaios do banco de dados, sendo elas: argilas arenosas, argilas orgânicas e turfas, argilas orgânicas, areias argilosas e siltes

argilosos. Com o banco de dados particionado, calculou-se novamente a média e desvio-padrão para os agrupamentos.

Na Tabela 9 é possível observar a faixa dos valores médios de  $\alpha$  para cada material, bem como o desvio-padrão. Verifica-se que o particionamento da amostra produz valores de desvio-padrão inferiores aos observados na amostra total, com exceção do grupo dos siltes e areias argilosas. Assim, é possível confirmar algum controle da textura sobre a definição do parâmetro  $\alpha$  como sugerido por Massarsch et al (1997).

Tabela 9 – Médias e desvio-padrão

	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>Argila arenosa</b>	5,6123	2,2384
<b>Argila orgânica</b>	3,4861	1,6771
<b>Argila orgânica e turfa</b>	3,3102	1,5771
<b>Areias argilosas e siltes argilosos</b>	4,3599	3,3580
<b>Amostra total</b>	4,4843	2,3307

Fonte: Autoral (2023).

A partir das análises feitas anteriormente, tanto sem, quanto com separação por texturas, foi possível continuar a análise dos dados obtidos buscando correlações que permitam prever  $\alpha$  a partir de medidas feitas no próprio ensaio CPTU ou então por meio de propriedades físicas de fácil determinação em laboratório. Assim, pretende-se identificar correlações com capacidade preditiva que supere a adoção das médias já encontradas, simplesmente.

#### 4.1.1 Análise univariada

As análises univariadas comparam correlações entre  $\alpha$  e características físicas ou mecânicas dos solos que compõem a amostra. Como forma de buscar melhorias nos modelos fez-se ainda um estudo sobre o impacto da não linearização da variável dependente, por assíntota ou potência. Isto foi feito inicialmente para a amostra sem particionamento.

#### 4.1.1.1 Sem separação por textura

Foram investigadas correlações entre  $\alpha$  e todas as variáveis descritas na Tabela 7. De forma geral são obtidos ajustes apenas modestos, com alguma melhoria quando se faz a não-linearização da variável dependente.

Após encontrar as linhas de tendência que melhor descrevem os dados para todas as variáveis a serem analisadas, os pares que obtiveram os menores valores de  $R^2$  foram dispensados da análise sendo estes apresentados na Tabela 10, e os que obtiveram os maiores valores de  $R^2$  são descritos na Tabela 11.

Tabela 10 – Variáveis com menores  $R^2$

	$\alpha$	$\alpha^c$	$1/\alpha$	Ajuste
	$R^2$			
<b>LL</b>	0,1893	0,2015	0,1671	Potência
<b>LP</b>	0,3754	0,2970	$\approx 0$	Potência
<b>IP</b>	0,0863	0,0726	0,0452	Exponencial
<b>IC</b>	0,1252	0,1383	0,1157	Potência
<b>Rf</b>	0,0079	0,0158	0,0141	Exponencial
<b>OCR</b>	0,0014	0,0013	$\approx 0$	Exponencial

Fonte: Autoral (2023).

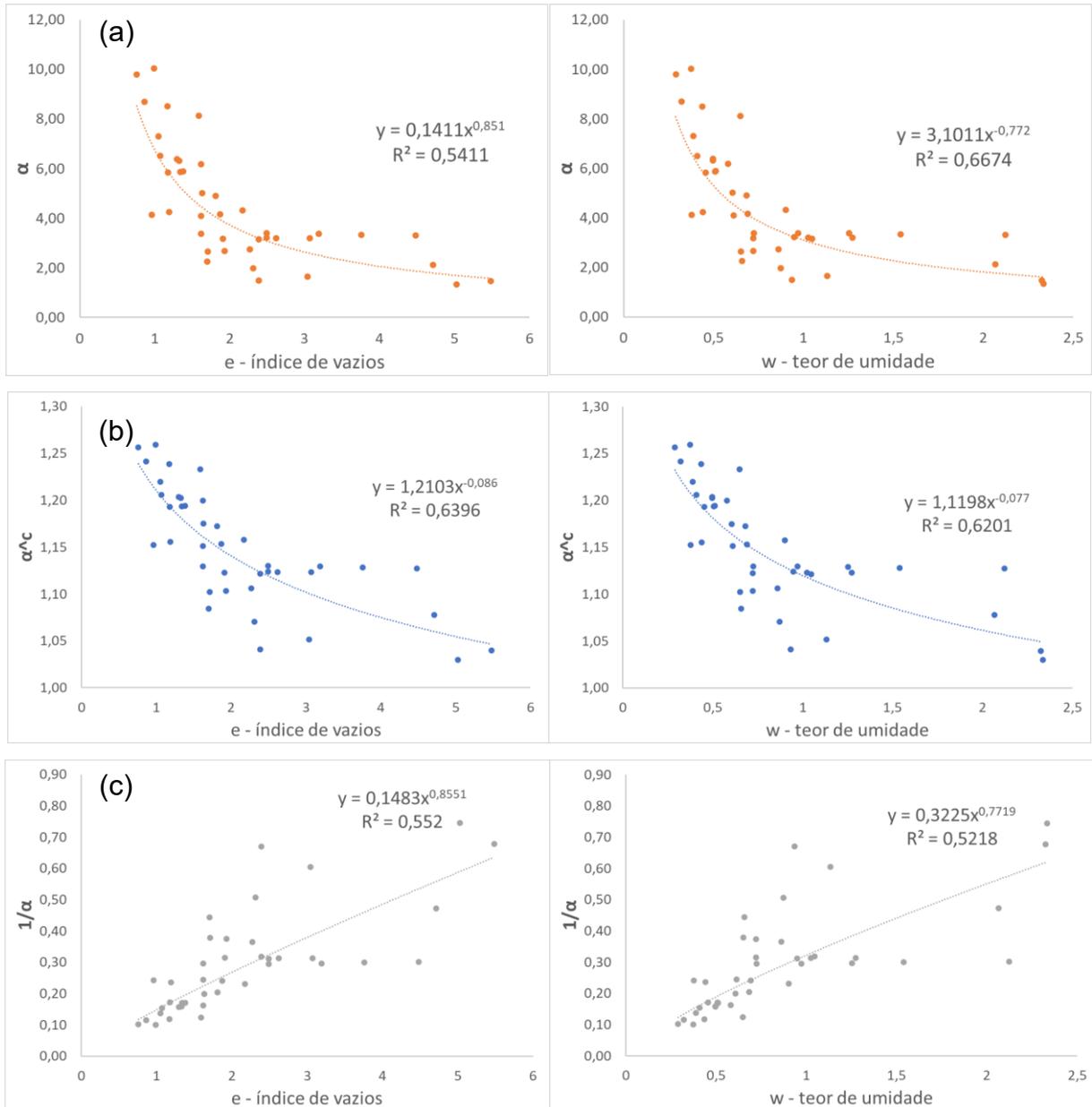
Tabela 11 – Variáveis com maiores  $R^2$

	$\alpha$	$\alpha^c$	$1/\alpha$	Ajuste
	$R^2$			
<b>e</b>	0,6745	0,6396	0,5520	Potência
<b>Cc</b>	0,7641	0,7850	0,7416	Potência
<b><math>\gamma_n</math></b>	0,6704	0,6344	0,5533	Exponencial
<b><math>\gamma_d</math></b>	0,6856	0,6401	0,5292	Exponencial
<b>w</b>	0,6674	0,6133	0,5218	Potência

Fonte: Autoral (2023).

Na Figura 13 demonstra-se, por meio das linhas de tendência para o mesmo par de variáveis, o efeito da não-linearização da variável dependente sobre os resultados. Neste exemplo foram utilizados os pares  $e-\alpha$  e  $w-\alpha$ , que apresentam poder preditivo relevante.

Figura 13 – Correlação (a)  $e-\alpha$  e  $w-\alpha$ , (b)  $e-\alpha^c$  e  $w-\alpha^c$ , e (c)  $e-1/\alpha$  e  $w-1/\alpha$

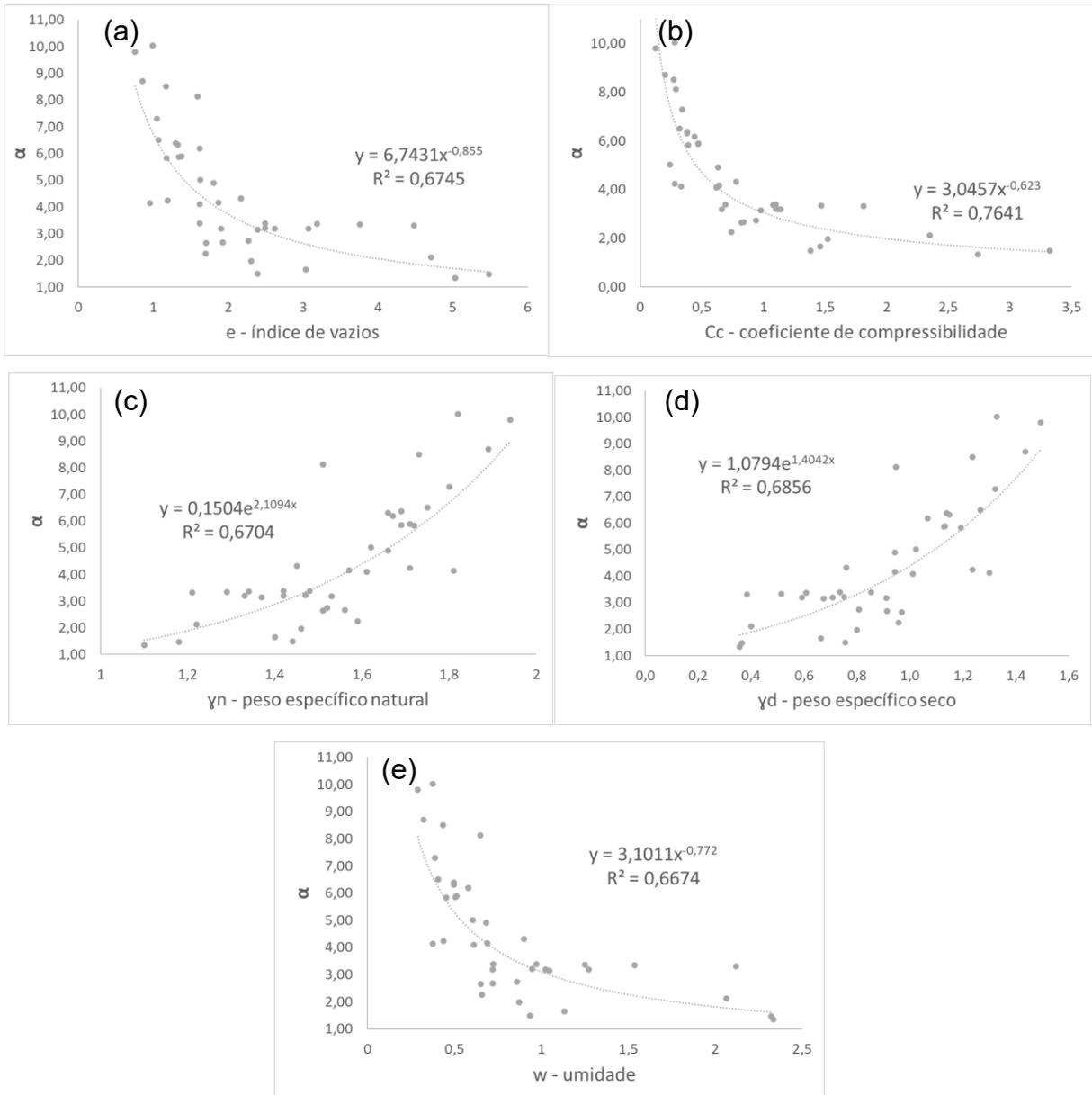


Fonte: Autoral (2023).

A partir da Figura 13 é possível observar que a manipulação de  $\alpha$ , ou não-linearização, não produz resultados melhores que a adoção de  $\alpha$  sem tratamento. Exceção é a associação de um expoente ao  $\alpha$  para previsão a partir do índice de vazios.

A partir do que foi apresentado na Tabela 11, as correlações que obtiveram os maiores valores de  $R^2$  são apresentadas na

Figura 14, sendo essas índice de vazios, coeficiente de compressibilidade, peso específico natural, peso específico seco e teor de umidade.

Figura 14 – Correlações entre  $e$ ,  $C_c$ ,  $\gamma_n$ ,  $\gamma_d$  e  $w$  com  $\alpha$ 

Fonte: Autoral (2023).

Desta maneira, as variáveis que possuem a maior correlação com o valor de  $\alpha$  são: índice de vazios ( $e$ ), coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ), peso específico natural do solo ( $\gamma_n$ ), peso específico seco do solo ( $\gamma_d$ ) e umidade ( $w$ ). É fundamental ressaltar que as equações utilizando os parâmetros  $C_c$  e  $e$  obtiveram os melhores resultados porque fez-se a utilização destes dois parâmetros para o cálculo do  $m_1$ , o qual posteriormente foi utilizado para estimar  $\alpha$ . Ainda assim, por uma questão de rigor aos achados na pesquisa as mesmas são descritas. As equações das linhas de tendência destes casos são:

$$\alpha = 6,7431e0^{-0,855} \therefore R^2 = 0,6745 \quad (45)$$

$$\alpha = 3,0457C_c^{-0,623} \therefore R^2 = 0,7641 \quad (46)$$

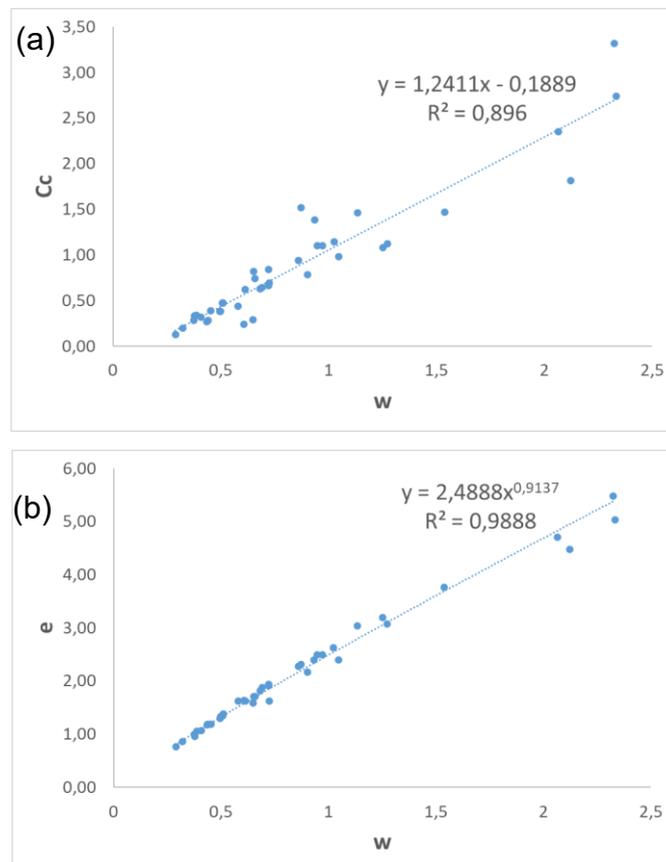
$$\alpha = 0,1504\exp(2,1094\gamma_n) \therefore R^2 = 0,6704 \quad (47)$$

$$\alpha = 1,0794\exp(1,4042\gamma_d) \therefore R^2 = 0,6856 \quad (48)$$

$$\alpha = 3,1011w^{-0,772} \therefore R^2 = 0,6674 \quad (49)$$

No entanto, é importante destacar que foram obtidas boas correlações entre  $C_c$  e o teor de umidade, e entre o índice de vazios e o teor de umidade, vide Figura 15. Assim, seria possível, em tese, estimar os valores de  $C_c$  e índice de vazios por meio do teor de umidade, e conseqüentemente, estimar-se  $\alpha$ . Ou, de forma mais direta, estimar  $\alpha$  via teor de umidade (Figura 14e).

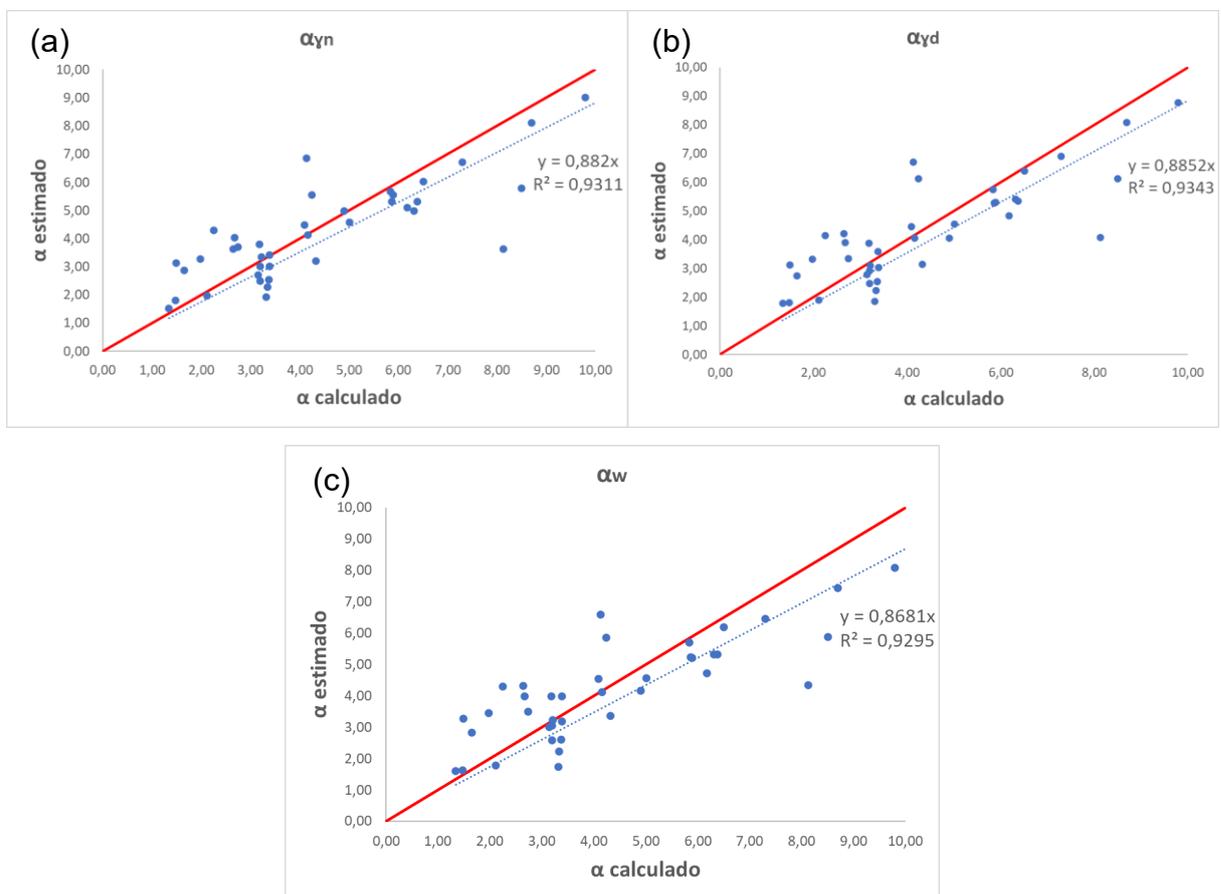
Figura 15 – Correlações entre (a)  $C_c$  e teor de umidade e (b) índice de vazios e  $w$



Fonte: Autoral (2023).

Ao se estimar  $\alpha$  usando os melhores modelos obtidos, exceto os que levam  $C_c$  ou índice de vazios que naturalmente oferecem bom ajuste, mas não são diretamente muito úteis por razões já discutidas, é possível observar razoável capacidade preditiva (Figura 16). As linhas vermelhas expressam uma relação 1:1 que indica perfeita correlação. As maiores dispersões ocorrem para os solos com  $\alpha$  mais elevado, tipicamente as areias e siltes argilosos.

Figura 16 – Correlação entre  $\alpha$  calculado e  $\alpha$  estimado pelas Equações (a) 47, (b) 48 e (c) 49



Fonte: Autoral (2023).

#### 4.1.1.2 Com separação por textura

A análise com separação por textura se deu da mesma maneira que a apresentada no tópico anterior. Os pares que obtiveram os maiores valores de  $R^2$  são mostrados na Tabela 12. Cabe destacar que as correlações com  $LP$  foram construídas com pequenas amostras, sendo, portanto, sujeitas a maiores incertezas.

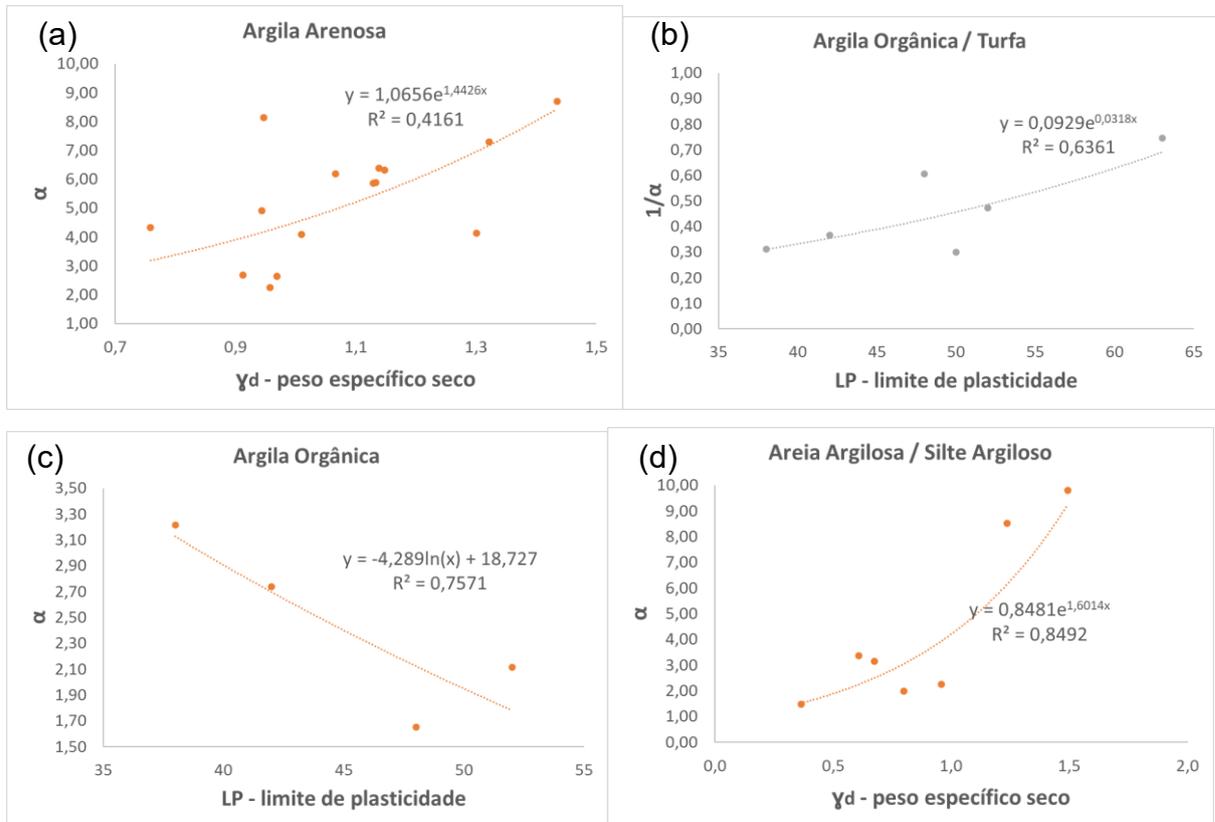
Tabela 12– Correlações com maiores  $R^2$

	$\alpha$	$\alpha^c$	$1/\alpha$	Ajuste
<b><math>R^2</math></b>				
<b>Argila Arenosa</b>				
<b><math>C_c</math></b>	0,7590	0,7641	0,7271	Exponencial
<b><math>\gamma_d</math></b>	0,4161	0,3689	0,2802	Exponencial
<b>Argila Orgânica / Turfa</b>				
<b><math>LP</math></b>	0,4796	0,5485	0,6361	Exponencial
<b><math>C_c</math></b>	0,8092	0,7109	0,6222	Potência
<b>Argila Orgânica</b>				
<b><math>LP</math></b>	0,7571	0,6961	0,6087	Logarítmica
<b><math>C_c</math></b>	0,8735	0,7803	0,6131	Potência
<b>Areia Argilosa / Silte Argiloso</b>				
<b><math>\gamma_d</math></b>	0,8492	0,7488	0,8492	Exponencial
<b><math>w</math></b>	0,8280	0,7199	0,6389	Potência

Fonte: Autoral (2023).

A partir do que foi apresentado na Tabela 12, a correlação que obteve o melhor  $R^2$  para cada textura é apresentado na Figura 17. As correlações com  $C_c$ , no entanto, não são exploradas, porque não são interessantes para o fim a que se propõe a pesquisa e o próprio método de previsão de recalques investigado.

Figura 17 – Correlações entre  $\gamma_d$  e  $LP$  com  $\alpha$  (a) argila arenosa, (b) argila orgânica / turfa, (c) argila orgânica e (d) areia argilosa e silte argiloso



Fonte: Autoral (2023).

Desta maneira, as variáveis com maior capacidade preditiva para cada tipo de textura foram:  $\gamma_d$  para argila arenosa, areia argilosa / silte argiloso e  $LP$  para argila orgânica / turfa e argila orgânica. Sendo que, apenas para argila orgânica / turfa foi utilizado  $1/\alpha$ . As equações para cada correlação são apresentadas a seguir:

$$\text{Argila arenosa: } \alpha = 1,065 \exp(1,4426\gamma_d) \therefore R^2 = 0,4161 \quad (50)$$

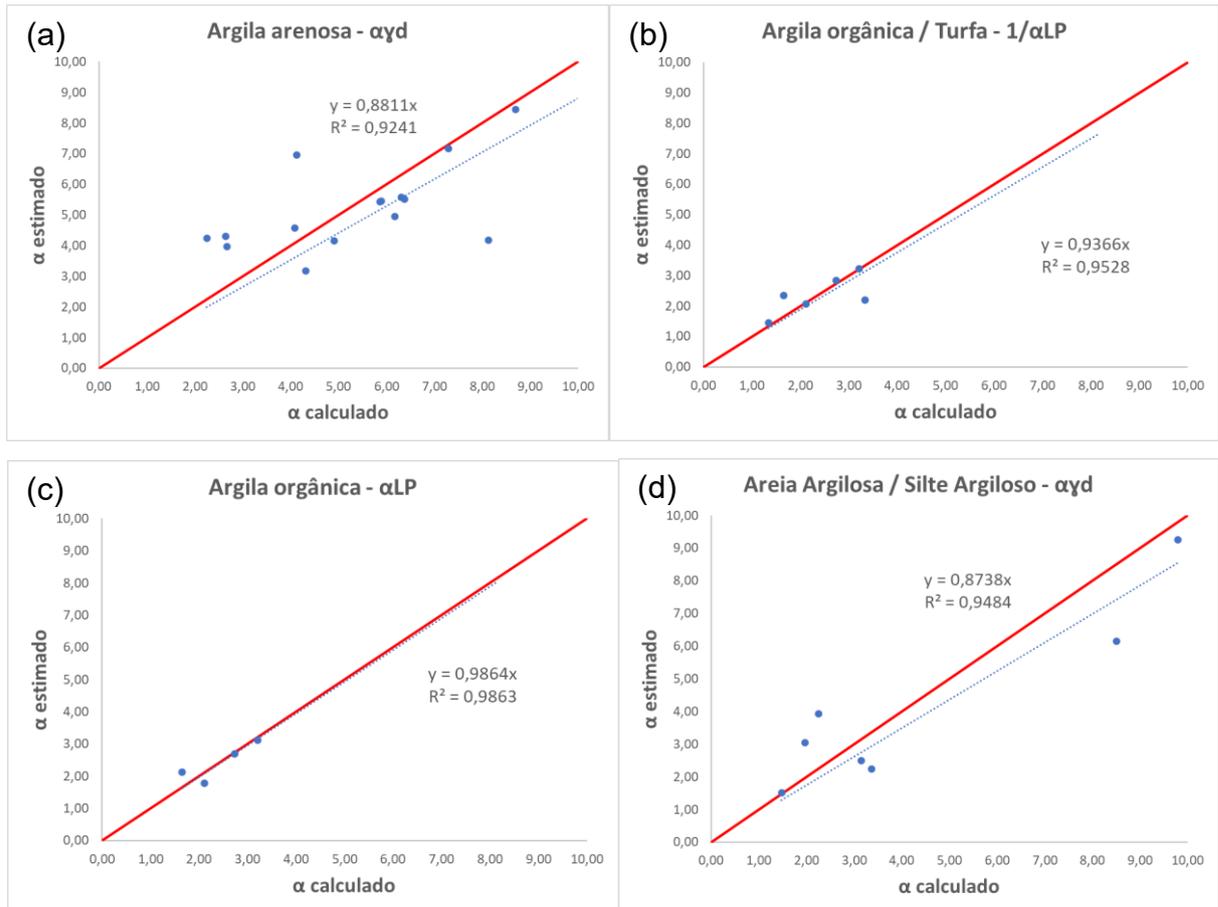
$$\text{Argila orgânica / turfa: } 1/\alpha = 0,0929 \exp(0,0318LP) \therefore R^2 = 0,6361 \quad (51)$$

$$\text{Argila orgânica: } \alpha = -4,289 \ln(LP) + 18,727 \therefore R^2 = 0,7571 \quad (52)$$

$$\text{Areia argilosa / silte argiloso } \alpha = 0,8481 \exp(1,6014\gamma_d) \therefore R^2 = 0,8492 \quad (53)$$

Os resultados obtidos ao estimar os valores de  $\alpha$  usando os melhores modelos obtidos para cada subconjunto (texturas), exceto os que levam  $C_c$ , são mostrados na Figura 18.

Figura 18 - Correlação entre  $\alpha$  calculado e  $\alpha$  estimado pelas Equações (a) 50, (b) 51, (c) 52 e (d) 53



Fonte: Autoral (2023).

### 4.1.2 Análise multivariada

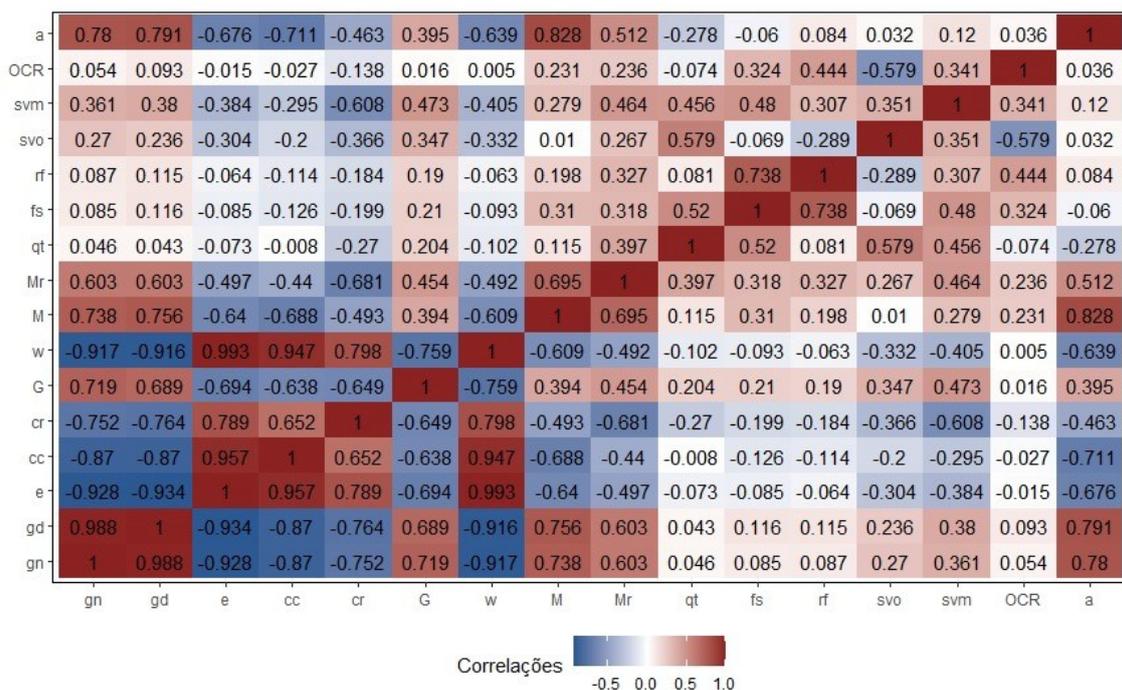
As análises multivariadas foram organizadas por famílias de modelos, sendo elas:

- A: banco de dados original;
- BC: modelos A após utilizar a transformação não-linear Box-Cox;
- B: com separação por textura usando variáveis *dummy*;
- C: modelo B após a utilização do procedimento *stepwise*.

Estes modelos foram construídos a partir de testes entre diferentes variáveis (as mais significativas) e  $\alpha$ . Analisou-se os valores de  $R^2$  e p-value de cada modelo. Aqueles com melhor desempenho foram submetidos às verificações de aderência dos resíduos à normalidade, multicolinearidade e heterocedasticidade, os quais são indicadores de modelos eficazes e acurados.

Previamente fez-se um novo estudo das correlações entre as variáveis, o qual é resumido na Figura 19, e que demonstra resultados aderente aos achados da etapa de análise univariada.

Figura 19 - Correlação entre  $\alpha$  e as variáveis explicativas.



Fonte: Autoral (2023).

As variáveis que apresentam melhores correlações com  $\alpha$ , conforme apresentado na Figura 19, são:  $\gamma_n$ ,  $\gamma_d$ ,  $e$ ,  $C_c$ ,  $w$  e  $m_1$ . Sendo que  $\gamma_n$ ,  $\gamma_d$  e  $m_1$  apresentam comportamento diretamente proporcional a  $\alpha$ , e as demais são inversamente proporcionais. Além disso, estas correlações fazem sentido com os dados apresentados no tópico interior, em que, as mesmas variáveis apresentaram boa correlação ao estimar  $\alpha$ . Ao se analisar as correlações de  $q_t$ ,  $f_s$  e  $r_f$ , que são dados oriundos dos ensaios CPTU, isoladamente com  $\alpha$ , constata-se serem fracas.

Nos seguintes tópicos serão analisadas as correlações de maneira multivariada, descritas por diferentes modelos, de forma a permitir identificar quais conjuntos de variáveis são mais eficientes para se estimar  $\alpha$ .

#### 4.1.2.1 Sem separação por textura

Para iniciar a análise de maneira multivariada foi utilizada a família de modelos A, o qual utiliza o banco de dados sem nenhum tratamento inicial dos dados. Exceção é a retirada das variáveis de  $IP$ ,  $LL$ ,  $LP$  e  $IC$ , por não possuírem boa significância na correlação com  $\alpha$  e não serem grandezas conhecidas para todas as observações que compõem a amostra.

Este conjunto foi desdobrado em oito modelos: A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8. As particularidades de cada modelo são descritas a seguir, as quais foram estabelecidas a partir das variáveis com mais elevada capacidade preditiva do modelo A1:

- A1: foi analisada a correlação de  $\gamma_n$ ,  $\gamma_d$ ,  $e$ ,  $C_c$ ,  $C_r$ ,  $G$ ,  $w$ ,  $M$ ,  $Mr$ ,  $q_t$ ,  $f_s$ ,  $r_f$ ,  $\sigma'_{v0}$ ,  $\sigma'_{vm}$  e  $OCR$  com  $\alpha$ ;
- A2:  $\gamma_n$  e  $q_t$  com  $\alpha$ ;
- A3:  $q_t$  e  $f_s$  com  $\alpha$ ;
- A4:  $q_t$  e  $e$  com  $\alpha$ ;
- A5:  $e$ ,  $q_t$  e  $G$  com  $\alpha$ ;
- A6:  $w$  e  $q_t$  com  $\alpha$ ;
- A7:  $e$ ,  $C_c$ ,  $G$ ,  $w$  e  $q_t$  com  $\alpha$ ;
- A8:  $C_c$  com  $\alpha$ .

A Tabela 13 apresenta os modelos (linha 1) e parâmetros testados (coluna 1), juntamente com o respectivo  $R^2$  de cada análise. A simbologia utilizada nos demais campos da tabela expressa a capacidade preditiva de cada variável no modelo como um todo, avaliada a partir da estatística t de student, sendo adotada a seguinte terminologia:

- “\*\*\*” para valores de t entre 0 e 0,001;
- “\*\*” para valores de t entre 0,001 e 0,01;
- “.” para valores de t entre 0,01 e 0,05;
- “ ” para valores de t menores que 0,05.

Assim, campos em branco representam variáveis sem relevância para a capacidade preditiva do modelo. Além disso, nas análises posteriores é apresentado nas tabelas o intercepto, sendo este válido quando considerada a faixa de valores igual a faixa utilizada na construção das equações. Este intercepto é essencial no funcionamento dos modelos.

Tabela 13 – Modelos analisados

	A1	Todos	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
	os dados		$\gamma_n$ e $q_t$	$q_t$ e $f_s$	$q_t$ e $e$	$e$ , $q_t$ e $G$	$w$ e $q_t$	$e$ , $C_c$ , $G$ , $w$ e $q_t$	$C_c$
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9492		0,7068	0,0872	0,5643	0,5654	0,5274	0,6741	0,5049
<b>Intercepto</b>			***	***	***	.	***		***
<b><math>\gamma_n</math></b>			***						
<b><math>\gamma_d</math></b>									
<b>e</b>					***	***		**	
<b><math>C_c</math></b>									***
<b><math>C_r</math></b>									
<b>G</b>								*	
<b>w</b>							***	**	
<b>M</b>		***							
<b>Mr</b>									
<b><math>q_t</math></b>	*		**	.	**	**	**	*	
<b><math>f_s</math></b>	*								
<b><math>r_f</math></b>	*								
<b><math>\sigma'_{v0}</math></b>									
<b><math>\sigma'_{vm}</math></b>									
<b>OCR</b>									

Fonte: Autoral (2023).

Inicialmente foi testado o modelo A1 utilizando todos os parâmetros, mesmo sabendo que há multicolinearidade entre as variáveis, isto é, a influência das variáveis se sobrepõe na estruturação do modelo. Por esse motivo, posteriormente foi feito o refinamento do modelo, testando combinações potencialmente relevantes. Como o objetivo deste trabalho é estimar recalques a partir do ensaio CPTU, ou por ensaios de caracterização física simples, os parâmetros  $C_c$  e  $C_r$  encontrados a partir do ensaio de adensamento, e o índice de vazios que requer amostras indeformadas, não serão foco das seguintes análises, mesmo sabendo que apresentam elevado poder preditivo. Igualmente o parâmetro  $M$  ( $m_1$ ) e  $Mr$ , calculados a partir dos dados dos ensaios de adensamento não tem relevância para os modelos. Na Tabela 14 é possível observar os coeficientes e o grau de significância para cada parâmetro do modelo inicial A1.

Tabela 14 – Modelo A1

<b>A1</b>	<b>Estimativa</b>	<b>Pr(&gt; t )</b>	
<b>Intercepto</b>	-1,42E-01	0,9821	
<b><math>\gamma_n</math></b>	-2,79E+00	0,5204	
<b><math>\gamma_d</math></b>	6,39E+00	0,1048	
<b>e</b>	1,70E+00	0,524	
<b><math>C_c</math></b>	-1,61E+00	1,38E-01	
<b><math>C_r</math></b>	-2,22E+00	0,3322	
<b>G</b>	-5,29E-01	0,8469	
<b>w</b>	9,39E-02	0,9851	
<b>M</b>	2,77E-01	5,95E-05	***
<b>Mr</b>	-5,30E-03	0,5015	
<b><math>q_t</math></b>	-2,30E-03	1,64E-02	*
<b><math>f_s</math></b>	-5,33E-02	0,0334	*
<b><math>r_f</math></b>	3,01E-01	0,0482	*
<b><math>\sigma'_{v0}</math></b>	1,73E-02	0,248	
<b><math>\sigma'_{vm}</math></b>	6,70E-03	0,3926	
<b>OCR</b>	-1,80E-01	0,1644	

Fonte: Autoral (2023).

Os demais modelos foram testados tentando analisar somente os parâmetros  $q_t$ ,  $f_s$ ,  $w$  e  $\gamma_n$ , porque são dados passíveis de obtenção pelo ensaio CPTU ou por ensaios de caracterização física, como teor de umidade do solo e peso específico.

Estes modelos são apresentados na Tabela 15, juntamente com seus coeficientes e grau de significância.

Tabela 15 – Modelos A2, A3 e A6

	A2 ( $y_n$ e $q_t$ )			A3 ( $q_t$ e $f_s$ )			A6 ( $w$ e $q_t$ )		
$R^2$	0,7068			0,0872			0,5274		
	Estimativa	Pr(> t )		Estimativa	Pr(> t )		Estimativa	Pr(> t )	
<b>Intercepto</b>	-8,76E+00	4,28E-06	***	5,43E+00	2,20E-10	***	8,12E+00	5,81E-15	***
$y_n$	9,23E+00	9,62E-11	***						
$w$							-2,92E+00	7,66E-07	***
$q_t$	-2,30E-03	1,13E-03	**	-2,50E-03	0,0736	.	-2,56E-03	4,17E-03	**
$f_s$				1,93E-02	0,5312				

Fonte: Autoral (2023).

Os demais modelos, A4, A5, A7 e A8 (Tabela 16), utilizam na análise o índice de vazios do solo, que está diretamente correlacionado com a deformação do solo, e  $C_c$  utilizado para calcular  $m_1$  e estimar  $\alpha$ . E por esses motivos, utilizando estes parâmetros foi possível observar o aumento do  $R^2$ .

Tabela 16 – Modelos A4, A5, A7 e A8

	A4 (e e $q_t$ )			A5 (e, $q_t$ e G)		
$R^2$	0,5643			0,5654		
	Estimativa	Pr(> t )		Estimativa	Pr(> t )	
<b>Intercepto</b>	8,53E+00	1,92E-15	***	1,04E+01	0,09908	.
<b>e</b>	-1,39E+00	1,64E-07	***	-1,46E+00	2,99E-05	***
<b>G</b>				-0,68406	0,76156	
$q_t$	-2,40E-03	4,51E-03	**	-2,38E-03	7,14E-03	**
	A7 (e, $C_c$ , G, w e $q_t$ )			A8 ( $C_c$ )		
$R^2$	0,6741			0,5049		
	Estimativa	Pr(> t )		Estimativa	Pr(> t )	
<b>Intercepto</b>	-1,21E+01	0,1853		6,55E+00	2,00E-16	***
<b>e</b>	-8,23E+00	0,0047	**			
<b><math>C_c</math></b>	-1,87E+00	1,10E-01		-2,35E+00	2,80E-07	***
<b>G</b>	7,91E+00	0,0274	*			
<b>w</b>	1,91E+01	5,20E-03	**			
$q_t$	-1,83E-03	2,26E-02	*			

Fonte: Autoral (2023).

Posteriormente foram construídos os modelos da família BC, baseados na aplicação da transformação não-linear de Box-Cox. Esta função busca estimar o melhor valor de  $\lambda$  para ajustar os dados aos modelos.

Os modelos testados são os seguintes: BC2 ( $y_n$  e  $q_t$ ), BC3 ( $q_t$  e  $f_s$ ), BC4 ( $e$  e  $q_t$ ), BC5 ( $e$ ,  $q_t$  e  $G$ ), BC6 ( $w$  e  $q_t$ ) e BC7 ( $e$ ,  $C_c$ ,  $G$ ,  $w$  e  $q_t$ ). A Tabela 17 apresenta  $R^2$ , coeficientes e grau de significância das variáveis. O  $\lambda$  para o modelo foi de 0,122.

Tabela 17 – Modelos BC2, BC3, BC4, BC5, BC6 e BC7

	BC2 ( $y_n$ e $q_t$ )			BC3 ( $q_t$ e $f_s$ )			BC4 ( $e$ e $q_t$ )		
$R^2$	0,7737			0,1476			0,6888		
	Estimativa	Pr(> t )		Estimativa	Pr(> t )		Estimativa	Pr(> t )	
<b>Intercepto</b>	-2,10E+00	3,65E-06	***	1,83E+00	2,34E-13	***	2,73E+00	2,00E-16	***
$y_n$	2,55E+00	1,70E-12	***						
$e$							-4,07E-01	6,59E-10	***
$q_t$	-7,57E-04	2,35E-05	***	-8,97E-04	0,016	*	-7,92E-04	1,16E-04	***
$f_s$				9,30E-03	0,251				
	BC5 ( $e$ , $q_t$ e $G$ )			BC6 ( $w$ e $q_t$ )			BC7 ( $e$ , $C_c$ , $G$ , $w$ e $q_t$ )		
$R^2$	0,6897			0,6553			0,8113		
	Estimativa	Pr(> t )		Estimativa	Pr(> t )		Estimativa	Pr(> t )	
<b>Intercepto</b>	3,17E+00	0,02963	*	2,62E+00	2,00E-16	***	-1,95E+00	2,97E-01	
$e$	-4,23E-01	5,51E-07	***				-1,579904	0,00783	**
$C_c$							-0,852041	0,00092	***
$G$	-0,16397	0,749952					1,7163045	0,02037	*
$w$				-0,8628495	4,49E-09	***	4,017139	0,00426	**
$q_t$	-7,79E-04	0,000232	***	-8,33E-04	0,00012	***	-6,05E-04	4,99E-04	***

Fonte: Autoral (2023).

De todos os modelos multivariados investigados, os denominados A2, A6 e BC2 foram tomados como os mais interessantes. Para estes modelos foram avaliados:

- A aderência dos resíduos do modelo à normalidade pelo teste de Shapiro-Francia, em que o modelo é aceito como adequado quando os resíduos aderem à uma distribuição normal.
- Multicolinearidade, que avalia a interferência de uma ou mais variáveis sobre as demais no processo preditivo;
- Heterocedasticidade, que visa identificar a ausência de relevante variável explicativa.

Na Tabela 18, é possível observar os resultados obtidos nos testes efetuados. Os modelos A2, A6 e BC2 obtiveram, no teste de Shapiro-Francia valores de p-value maiores que 0,05, assim podendo ser aceita a hipótese nula sob um índice de confiança é de 95%, e logo, os resíduos são aderentes a normalidade. Já na análise de multicolinearidade, se o VIF for igual a 1 não existe multicolinearidade. Caso seja maior as variáveis podem estar correlacionadas. É problemático para o modelo o fator atingir valores da ordem de 10, quando então os coeficientes de regressão estarão mal estimados devido à multicolinearidade (MINITAB, 2019). Quanto à ocorrência de heterocedasticidade, percebe-se que os modelos A6 e BC2 se mostram adequados (homocedásticos), mas o modelo A2 não.

Tabela 18 – p-value e VIF para os modelos A2, A6 e BC2

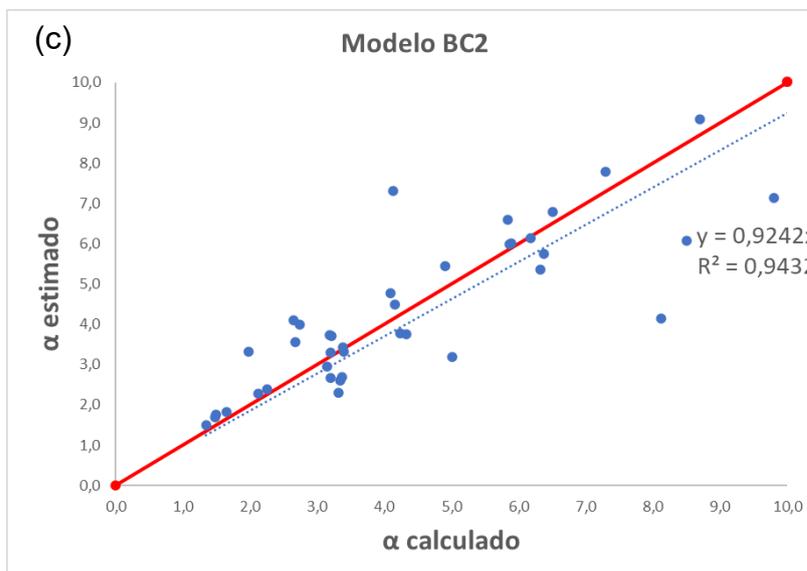
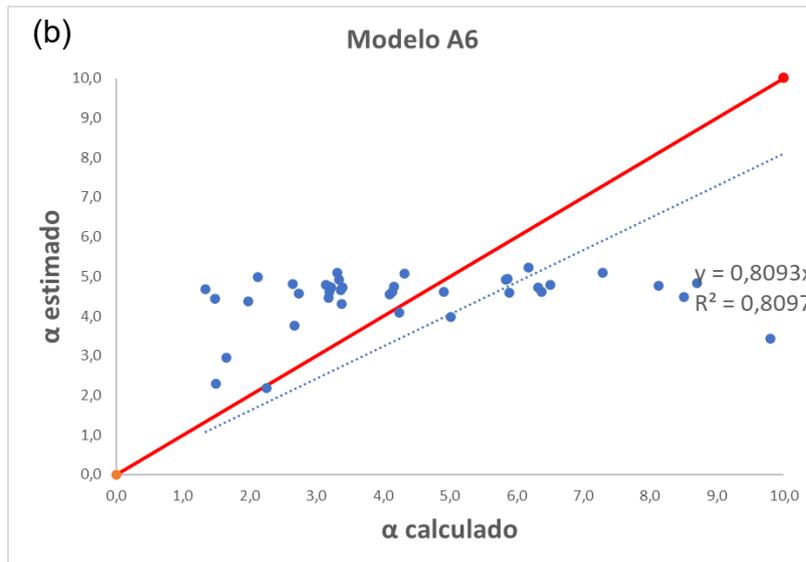
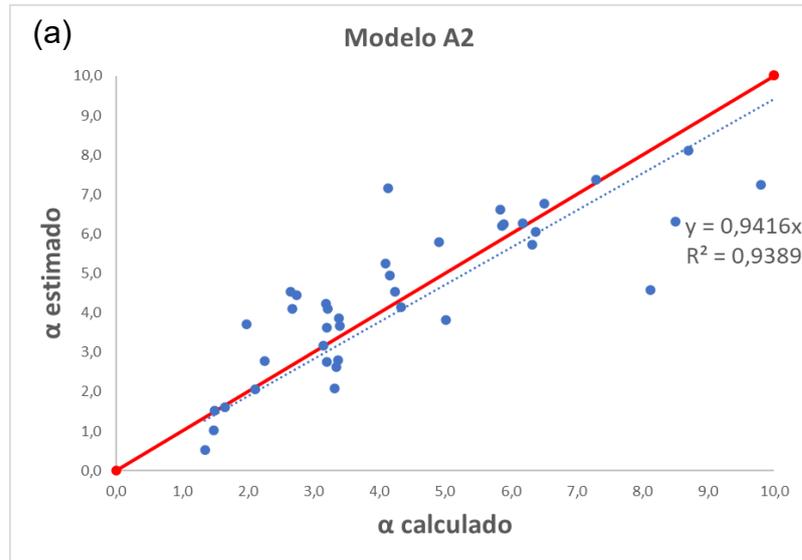
	Condições para ser aceito	A2	A6	BC2
<b>Aderência dos resíduos à normalidade</b>	p-value > 0,05	0,0975	0,1414	0,1287
		H0 aceita	H0 aceita	H0 aceita
<b>Multicolinearidade</b>	VIF ≈ 1	1,002125	1,010553	1,002125
		Não ocorre multicolinearidade	Não ocorre multicolinearidade	Não ocorre multicolinearidade
<b>Heterocedasticidade</b>	p-value > 0,05	0,0249	0,0984	0,5240
		H0 rejeitada	H0 aceita	H0 aceita

Fonte: Autoral (2023).

Diante destes resultados é possível considerar o modelo BC2 como o mais apropriado na previsão dos valores de  $\alpha$ , já que apresenta melhor  $R^2$  dentre os testados e atende, adequadamente, as verificações feitas para aferição da qualidade do modelo. Cabe observar a capacidade da transformação de Box-Cox de solucionar a heterocedasticidade do modelo A2.

A partir dos coeficientes e suas variáveis apresentadas na Tabela 15 e Tabela 17, foi possível comparar os resultados de  $\alpha$  estimado e  $\alpha$  calculado inicialmente no trabalho. Fez-se uso dos modelos A2, A6 e BC2 e os resultados são apresentados na Figura 20.

Figura 20 –  $\alpha$  calculado vs  $\alpha$  estimado pelos modelos (a) A2, (b) A6 e (c) BC2

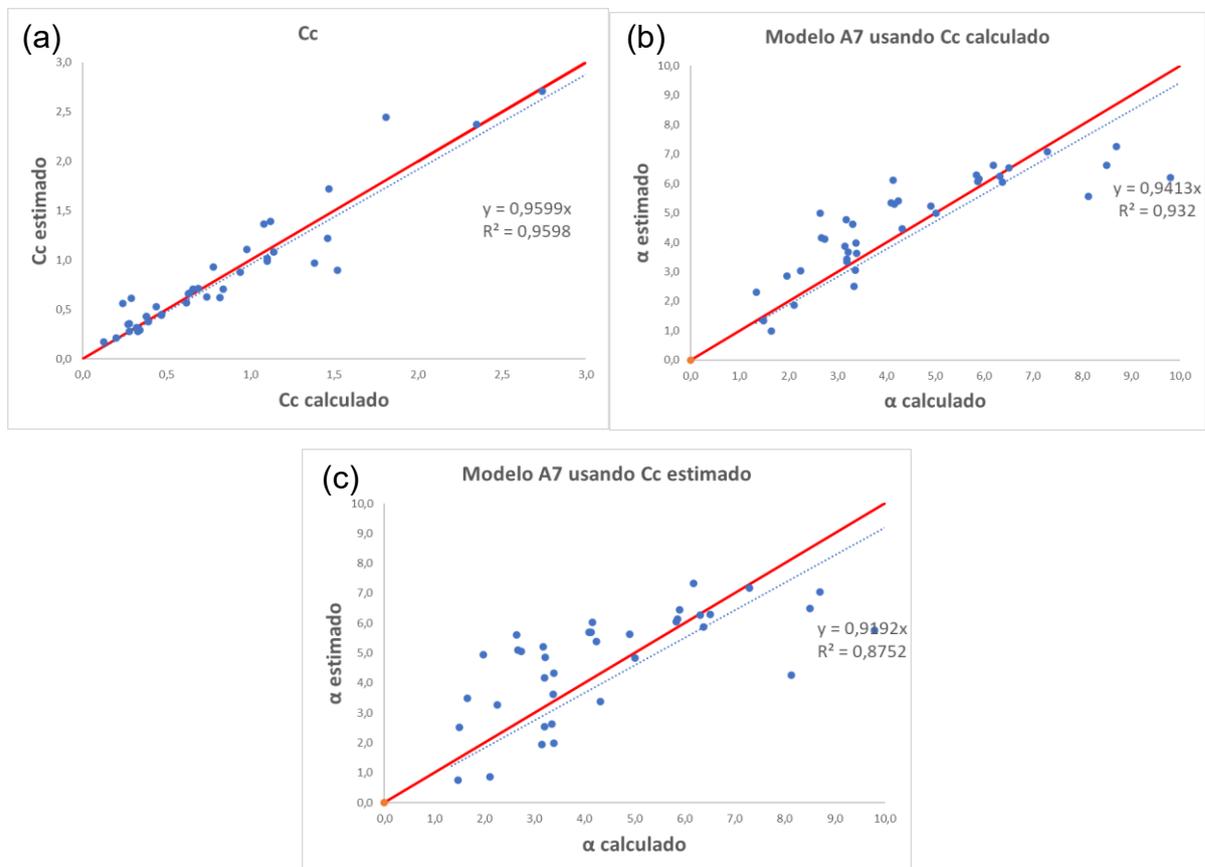


Fonte: Autoral (2023).

A Figura 20 torna visível a diferença de qualidade entre os modelos A2/BC2 e A6, apesar de apresentarem valores de  $R^2$  não tão distantes entre si. O modelo BC2 apresenta valores de  $\alpha$  bem estimados, apresentando maior variação para valores de  $\alpha$  superiores a 7.

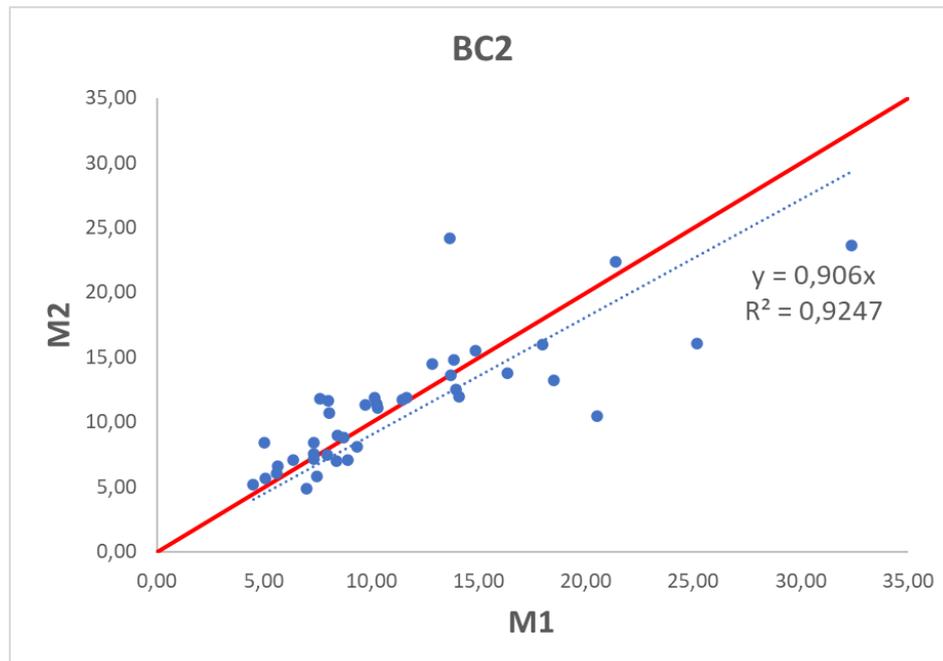
Adicionalmente, investigou-se o desempenho obtido ao se fazer uso de uma estimativa de  $C_c$  via teor de umidade para, posteriormente, estimar  $\alpha$  com base em  $C_c$ . Os resultados são graficamente apresentados na Figura 21.

Figura 21 – (a)  $C_c$  calculado vs  $C_c$  estimado, (b) utilizando  $C_c$  calculado e (c) utilizando  $C_c$  estimado



Fonte: Autoral (2023).

De forma a ilustrar a capacidade preditiva do modelo BC2, bem como a dispersão produzida sobre o parâmetro  $m_2$ , este é plotado contra os valores de  $m_1$  na Figura 20. O modelo se mostra bastante consistente, sendo os maiores erros associados aos valores de  $m$  superiores à 15, os quais, segundo Fellenius (2006), estariam associados a solos argilosos ou siltosos rijos a duros.

Figura 22 –  $m_1$  vs  $m_2$ 

Fonte: Autoral (2023).

#### 4.1.2.2 Com separação por textura

Os modelos multivariados foram empregados no estudo dos efeitos da textura no processo de previsão de  $\alpha$ . O modelo B1 corresponde a uma variação do modelo A1 com a adoção dos tipos de solo como variáveis *dummies*. Uma variável dummy é binária e leva o nome de uma das classes observadas para uma variável em um banco de dados. Havendo  $n$  classes para uma dada variável, são criadas  $n-1$  variáveis dummies. Quando uma dada observação do banco de dados tem sua classe igual àquela que dá nome à variável dummy, esta variável assume valor unitário, do contrário o valor assumido é nulo.

Ao ser testado o modelo com a inclusão de todas as variáveis de A1 e incluídas as dummies obteve-se  $R^2$  de 0,9542, similar portanto ao modelo sem dummies (A1). As variáveis que obtiveram significância foram  $m_1$ ,  $r_f$  e  $\gamma_d$ , obtendo  $\Pr(>|t|)$  de 0,1 a 0,05. Isto demonstra fraco poder preditivo para o modelo, e em segunda instância, a baixa relevância da textura para previsão de  $\alpha$ .

Posteriormente, aplicou-se o procedimento *stepwise* ao modelo B. Este procedimento testa e exclui do modelo as variáveis que se mostram pouco

representativas para a capacidade preditiva do mesmo (considerando uma significância menor que 5%).

Este modelo, denominado C1, obteve  $R^2 = 0,9357$ , e tem como variáveis explicativas  $\gamma_n$ ,  $m_1$ ,  $q_t$ ,  $f_s$ ,  $r_f$ ,  $\sigma'_{vm}$  e  $OCR$ . Portanto, após o procedimento *stepwise* ficou demonstrado que a variável textura não se mostrou significativamente relevante para a capacidade preditiva do modelo testado. Os coeficientes e o grau de significância para este modelo são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Modelo C1

<b>C1</b>	<b>Estimativa</b>	<b>Pr(&gt; t )</b>	
<b>Intercepto</b>	4,86E-01	0,2629	
<b><math>\gamma_n</math></b>	1,43E+00	2,71E-02	*
<b>M</b>	3,12E-01	1,77E-11	***
<b><math>q_t</math></b>	-2,19E-03	1,03E-04	***
<b><math>f_s</math></b>	-5,68E-02	0,001546	**
<b><math>r_f</math></b>	3,22E-01	0,005795	**
<b><math>\sigma'_{vm}</math></b>	1,08E-02	4,99E-02	*
<b>OCR</b>	-2,84E-01	2,80E-04	***

Fonte: Autoral (2023).

Porém, como este modelo depende fortemente de  $M=m_1$ , o qual é calculado a partir de  $e$  e  $C_c$ , não se seguiu com a exploração do mesmo dada a baixa relevância para os objetivos da pesquisa.

## 4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS

Dentre todos os modelos apresentados anteriormente, os que obtiveram os melhores resultados foram: A2 ( $\gamma_n$  e  $q_t$ ;  $R^2 = 0,7068$ ), A6 ( $w$  e  $q_t$ ;  $R^2 = 0,5254$ ) e BC2 ( $\gamma_n$  e  $q_t$ ;  $R^2 = 0,7737$ ). Para os testes, os modelos A2, A6 e BC2 tiveram os resíduos aderentes à normalidade ( $H_0$  é aceita),  $VIF = 1$ , logo, não ocorre multicolinearidade e A6 e BC2 apresentam comportamento homocedástico, diferente do modelo A2 que é heterocedástico.

Com isso, a melhor estimativa do parâmetro  $\alpha$  foi o modelo BC2, sendo este a transformação não-linear do modelo A2.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo calibrar o parâmetro  $\alpha$  ao correlacionar  $m_1$  e  $m_2$ , apresentados por Janbu, para obter um modelo de previsão de estimativas de recalques sem a utilização de parâmetros oriundos do ensaio de adensamento ( $m_1$ ). Desta forma, foi possível a partir de um banco de dados composto por mais de 40 observações relacionadas a solos finos sedimentares analisar as correlações de variáveis obtidas do ensaio CPTU ou de caracterização física simples com  $\alpha$ . O trabalho explorou correlações de tais grandezas com  $\alpha$  a partir de análises univariadas multivariadas.

Na primeira parte deste trabalho, que objetivou calcular os valores de  $\alpha$  correlacionando  $m_1$  (ensaio de adensamento) com  $m_2$  (ensaio CPTU), foram obtidos valores médios de 4,48 e desvio padrão de 2,33 para  $\alpha$ , sendo que a maior parte dos dados se encontram entre 1,34 e 3,74. Além disso, o maior valor calculado foi de 10,94. Ao comparar tais dados com os reportados por Massarsch et al (1997), ficou evidente que a dispersão dos dados é coerente com o apresentado pelos autores, mas neste trabalho foram encontradas também observações com valores cerca de 50% menores que o valor médio proposto para argilas moles por tais autores, e o valor máximo é inferior ao proposto na literatura para siltes fofos.

A análise univariada, sem separação dos solos por textura, apresentou bons resultados ao se correlacionar  $\alpha$  com  $\gamma_n$ ,  $\gamma_d$  e  $w$ , sem a utilização de ajustes ao  $\alpha$  como  $a^c$  e  $1/\alpha$ , obtendo assim, o coeficiente da reta  $\alpha_{\text{calculado}} - \alpha_{\text{estimado}}$  próximos a 0,88, em que as maiores dispersões ocorrem para os solos com  $\alpha$  mais elevado, tipicamente as areias e siltes argilosos. Já com separação por textura, os coeficientes das retas variaram de 0,85 a 0,94. Quando os materiais são separados por textura há uma diminuição de observações em cada categoria, sendo então as análises sujeitas a maiores incertezas.

A análise multivariada utilizou os modelos A, BC, B e C. A família do modelo A foi separada em A1 à A8, em que os modelos A2, A3 e A6 utilizam apenas a correlação de variáveis de ensaio CPTU ou caracterização física, e os demais utilizam variáveis como  $e$  e  $C_c$  oriundas do ensaio de adensamento. Ao analisar o modelo A foi possível encontrar que os coeficientes das retas, dos modelos A2 e A6,  $\alpha$  calculado vs  $\alpha$  estimado próximo a 0,94. Posteriormente foi analisada a estimativa do valor de  $e$

e  $C_c$  a partir do teor de umidade, a fim de utilizar o modelo A7, obtendo um coeficiente angular de 0,92.

Dentre os modelos BC, que se baseiam na aplicação da transformação de Box-Cox, o melhor modelo apresentado foi BC2, obtendo coeficiente de reta próximo a 0,9. Já os modelos B e C, em que se introduz a variável textura, demonstraram que a textura não se mostra uma variável com significativa capacidade preditiva para estimativa de  $\alpha$ .

Ao final, foram verificados os modelos A2, A6 e BC2, quanto à ocorrência de aderência dos resíduos à normalidade, ocorrência de multicolinearidade e de heterocedasticidade. Demonstrou-se que os modelos A6 e BC2 atendem a todos estes testes/pressupostos estatísticos. O modelo A2 apresenta alguma heterocedasticidade, mas é qualificado nos demais testes. Assim, o modelo definido como o mais adequado é o BC2, o qual correlaciona as variáveis  $\gamma_n$  e  $q_t$  com  $\alpha$ .

Na prática os resultados deste trabalho se aplicam como uma ferramenta para ampliação das análises de recalques em situações em que se dispõe de ensaios CPTU em maior quantidade do que de ensaios de adensamento. Naturalmente que os resultados não suprimem a necessidade da execução de ensaios de adensamento, mas permitem melhorar as estimativas de recalques por conseguir expandir os resultados a partir dos ensaios de piezocone.

## REFERÊNCIAS

- SOCIEDADE AMERICANA DE TESTES E MATERIAIS. **D5778**: Teste de Penetração de Cone de Fricção Eletrônico e Piezocone de Solos 1. Estados Unidos, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16853**: Solo - Ensaio de Adensamento Unidimensional. 1 ed. Rio de Janeiro, 2020.
- Box G.E.P.; Cox D.R. 1964. **Journal of the Royal Statistical Society**. Series B (Methodological).
- Canadian Foundation Engineering Manual, CFEM, 1992. Third Edition. Canadian Geotechnical Society, BiTech Publishers, Vancouver.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.
- CASAGRANDE, A. (1936). **The Determination of Preconsolidation Load and its Practical Significance**. In: Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge. Proceedings... Cambridge: Harvard University, Graduate School of Engineering, 3v. v.3, p60-64.
- CHIODE, A. S. **Avaliação de propostas de coeficientes de determinação do tipo  $R^2$  em modelos de regressão logística com resposta nominal**. 2020. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
- DAS, Braja M. **Fundamentos da engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2007. Tradução da 6ª edição norte-americana.
- FÁVERO, L.P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados**: estatística e modelagem multivariada com Excel, SSPS e Stata. Rio de Janeiro: LTC, 2021.
- FELLENIUS, Bengt H. **Basics of Foundation Design**. Calgary: Eletronic Edition, 2006.
- FERNANDES, Manuel de Matos. **Mecânica dos solos**: conceitos e princípios fundamentais. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- Gujarati, D.N. 2011. **Econometria Básica**, 5a ed. Porto Alegre, Bookman.
- IRTP/ISSMFE. **Subcommittee on Standardization for Europe, report on the penetration test use in Europe**. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Tokyo, v. 3, p. 95-152, 1977.
- IRTP/ISSMFE. **International reference testing procedure for cone penetration tests (CPT)**. Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils: TC-16, with reference to Test Procedures. Information 7. Linköping: Swedish Geotech. Inst., 1988a. p. 6-16.

Massarsch, K.R., (1994). **Settlement Analysis of Compacted Fill. Proceedings**, 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE, New Delhi, Vol. 1, pp. 325 - 328.

Massarsch, K.R., Westerberg, E., and Broms, B.B., 1997. **Footings supported on settlement-reducing vibrated soil nails**. 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE, Hamburg 97, Vol. 3, pp. 1533 - 1539.

MINITAB. **Lidando com a multicolinearidade na análise de regressão**. 2019. Disponível em: < <https://blog.minitab.com/pt/basta-lidando-com-a-multicolinearidade-na-analise-de-regressao>> Acesso em: 5 nov. 2023.

PACHECO SILVA, F. (1970). **Uma Nova Construção Gráfica para a Determinação da Pressão de Pré-Adensamento de uma Amostra de Solo**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 4. Guanabara. Anais... v.2, p.219- 223.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ROBERTSON, P. K. **Soil classification using the cone penetration test**. Canadian Geotech. Journal, v.27, n.1, p.151-158, 1990.

ROBERTSON, P. K.; WRIDE, C. E. **Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test**. Canadian Geotech. Journal, Ottawa, v. 35, n. 3, p. 442-459, 1998.

SCARIOT, Rafaela Tainá. **Avaliação de Recalques em Solos Finos com o uso dos Ensaios CPTU e de Adensamento**: método de recalques de Janbu. 2022. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Engenharia da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.

SCHNAID, Fernando; ODEBRECHT, Edgar. **Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

Shapiro S.S.; Francia R.S. 1972. **An Approximate Analysis of Variance Test for Normality**. Journal of the American Statistical Association, 67(337). doi:10.2307/2284728

SOARES, T.C. **O que é heterocedasticidade**. 2021. Disponível em: < [https://youtu.be/i-fLov\\_lm0Y](https://youtu.be/i-fLov_lm0Y) >. Acesso em: 5 nov. 2023.

Terzaghi, K., 1943. **Theoretical Soil Mechanics**. John Wiley and Sons, New York, 511 p.

Terzaghi K.; Peck R.B.; Mesri G. 1996. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3rd Edition, John Wiley and Sons, Inc.; New York.

Vasconcellos M.A.S.; Alves D. 2000. **Manual de econometria**. São Paulo, Atlas.