

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGE

TALITA MENEGAZ

**ANÁLISE DE CORRELAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO
A PARTIR DE RESULTADOS DO ENSAIO CPTU**

JOINVILLE

2022

TALITA MENEGAZ

**ANÁLISE DE CORRELAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO
A PARTIR DE RESULTADOS DO ENSAIO CPTU**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientador: Prof. Edgar Odebrecht, Dr.

Coorientadora: Prof. Helena Paula Nierwinski, Dra.

JOINVILLE

2022

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Menegaz, Talita
ANÁLISE DE CORRELAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO
PESO ESPECÍFICO A PARTIR DE RESULTADOS DO ENSAIO
CPTU/ Talita Menegaz - 2022.
84 p.

Orientador: Edgar Odebrecht
Coorientadora: Helena Paula Nierwinski
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2022.

1. Peso específico do solo. 2. Ensaio CPTu. 3. Densidade real
dos grãos. 4. Correlações
I. Odebrecht, Edgar. II. Nierwinski, Helena P. III. Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

TALITA MENEGAZ

**ANÁLISE DE CORRELAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO
A PARTIR DE RESULTADOS DO ENSAIO CPTU**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientador: Prof. Edgar Odebrecht, Dr.

Coorientadora: Prof. Helena Paula Nierwinski, Dra.

BANCA EXAMINADORA

Profº Edgar Odebrecht, Dr.

CCT/UDESC

Presidente/Orientador

Membros:

Profº Edgar Odebrecht, Dr.

CCT/UDESC

Presidente/Orientador

Profº Fernando Schnaid, PhD.

UFRGS

Profª Gracieli Dienstmann, Dra.

UFSC

Joinville, setembro de 2022

À minha família, que é a base de tudo,
dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, toda honra e glória, à Ele toda minha devoção. Com a intercessão de meu pai espiritual São Padre Pio de Pietrelcina, Nossa Senhora e São José sigo no caminho por Ele trilhado para minha vida.

Minha profunda gratidão e admiração, ao meu orientador e mentor, Prof. Dr. Edgar Odebrecht, por reavivar em mim a paixão pela mecânica dos solos. Agradeço pela paciência, compreensão e dedicação total a este projeto, mas principalmente, por sua amizade.

À minha co-orientadora, Prof. Dr. Helena Paula Nierwinski, primeiramente pela sua total e completa dedicação ao meu trabalho e sua amizade. Sua colaboração, incentivo, disponibilidade e principalmente paciência foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. PhD Fernando Schnaid, pela sua colaboração com este estudo. Seu incentivo, disponibilidade e amizade foram de extrema importância para elaboração deste trabalho.

À empresa Geoforma Engenharia Ltda, pela disponibilidade dos dados de ensaios, fundamentais para que os objetivos desta pesquisa fossem atingidos, pelo apoio, disponibilidade e atenção de toda equipe.

Ao Prof. PhD Paul Mayne, pela disponibilidade do banco de dados, do qual esta pesquisa fez utilização para um resultado mais promissor, pelos conselhos e incentivo.

Ao Prof. Dr. Ricardo Pfitscher, pelo apoio, dedicação, disponibilidade. Além disso sua paciência e amizade.

À Prof. Dr. Gracieli Dienstmann, pela sua colaboração com este estudo, disponibilidade e carinho comigo.

À coordenadora do PPGEC, Prof. Dra. Elisa Henning, que se fez presente na minha trajetória, me auxiliou e me deu suporte pessoal e pelo programa.

Aos meus professores, Dr. Tiago J. Belli, Dra. Andreza Kalbusch e Dr. Leonardo Monteiro, pela dedicação e incentivo.

À minha família, pelo entusiasmo com que sempre lidaram com os desafios aos quais me proponho e ao incentivo incessante, vocês são meu tudo.

À Natalia Ziesmann, pela amizade e parceria nesta caminhada. Por nunca se negar quando eu recorri ao auxílio e sempre com um ombro amigo disponível.

À Regiane de Natália, a qual é responsável pela minha inscrição de última hora neste programa, que me incentivou e incentiva, que acredita mais em mim do que eu mesma, pela sua amizade.

Aos meus colegas de mestrado, pela parceria, companheirismo e incentivo nesta etapa.

Aos demais envolvidos direta e indiretamente, que contribuíram para a conclusão deste trabalho, pelo apoio incentivo e compreensão.

“O meu passado, Senhor, à tua misericórdia. O meu presente, ao Teu amor. O meu futuro, à Tua providência.”

São Padre Pio de Pietrelcina

RESUMO

A avaliação do comportamento dos solos é complexa e requer a definição de diferentes parâmetros geotécnicos. Alguns dos parâmetros de grande importância para a Engenharia Geotécnica dependem de propriedades do solo e uma delas é o peso específico, o qual é fundamental para o cálculo de tensões geostáticas. O peso específico pode ser obtido de forma direta através de amostras indeformadas ou de forma indireta através de correlações com ensaios de campo. Quando obtidos a partir de amostras indeformadas coletadas implicam em custos e consumo de tempo. Assim correlações entre resultados do ensaio de cone com o peso específico são altamente atrativas para a adequada interpretação do comportamento do solo e determinação de parâmetros de projeto. Algumas correlações são propostas pela literatura para estimativa do peso específico natural dos solos, com base em resultados de ensaios de campo, todavia a grande maioria das correlações foi desenvolvida para solos naturais, considerando uma faixa limitada de valores de densidade real dos grãos (G), a qual geralmente está entre 2,5 e 2,7. Considerando a difundida aplicação do ensaio de cone tanto em depósitos de solos moles, quanto em depósitos de rejeitos de mineração, há necessidade de avaliação de correlações para estimativa do peso específico para faixas mais amplas de valores de densidade real dos grãos. O presente trabalho busca organizar um banco de dados composto por resultados de ensaios de cone e ensaios de laboratório em solos cujos valores de G variam de 1,5 a 4,5. Através do coeficiente de correlação de Pearson, com auxílio do software estatístico *R Studio*, foi possível analisar a aplicabilidade das propostas existentes ao banco de dados estudado. Além disso, com a parte do banco de dados utilizada para desenvolvimento, novas equações são propostas para determinação do parâmetro peso específico, as quais são verificadas com o restante do banco, reservado para este fim. Conclui-se que a resistência de ponta, atrito lateral e a densidade real dos grãos tem um peso estatístico mais pronunciado na estimativa do peso específico natural do solo e por fim propõem-se novas correções entre estes dados e o peso específico natural do solo.

Palavras-chave: Peso Específico. Correlações. Ensaio CPTu. Densidade real dos grãos.

ABSTRACT

The evaluation of soil behavior is complex and requires the definition of different geotechnical parameters. Some of the parameters of great importance for Geotechnical Engineering depend on soil properties and one of them is the unit weight, which is fundamental for the calculation of geostatic stresses. The unit weight can be obtained directly through undeformed samples or indirectly through correlations with field tests. When obtained from undeformed samples collected they imply costs and time consumption. Thus, correlations between results of the cone test and the unit weight are highly attractive for the proper interpretation of soil behavior and determination of project parameters. Some correlations are proposed in the literature to estimate the soil unit weight, based on results of field trials, however, the vast majority of correlations were developed for natural soils, considering a limited range of values of specific gravity of solids (G), which is usually between 2.5 and 2.7. Considering the widespread application of the cone test both in soft soil deposits and in mine tailings deposits, there is a need to evaluate correlations to estimate the specific gravity for wider ranges of values of true specific gravity of solids. The present work seeks to organize a database composed of results from cone tests and laboratory tests in soils whose G values range from 1.3 to 4.5. Through the Pearson correlation coefficient, with the aid of the statistical software *R Studio*, it was possible to analyze the applicability of the existing correlations to the studied database. Besides, with the part of the database used for development, new equations are proposed for determining the soil unit weight property, which are verified with the rest of the database, reserved for this purpose. It is concluded that the tip resistance, lateral friction and the specific gravity of solids have a more pronounced statistical weight in the estimation of the natural soil unit weight and finally new corrections are proposed between these data and the natural soil unit weight.

Keywords: Unit Weight. Correlations. CPTu test. Specific gravity of solids.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 Estrutura do trabalho	19
Figura 2.1 Localização das possíveis medições de poropressão	28
Figura 2.2 Correlação para peso específico através de velocidade de onda cisalhante e profundidade	33
Figura 2.3 Avaliação de peso específico saturado a partir de valores de V_{s1} normalizados em solos não cimentados	34
Figura 2.4 Relação proposta entre os resultados do CPT e o peso específico do solo	36
Figura 2.5 Comparação entre os pesos unitários do solo medidos e os dados estimados pela correlação do método Robertson (2010)	37
Figura 2.6 Valores de resistência do cone com a profundidade	38
Figura 2.7 Relação entre peso específico e parâmetro mq	39
Figura 2.8 Relação entre peso específico e equacionamento proposto	40
Figura 2.9 Relação entre o peso específico total e a profundidade abaixo do fundo do mar em depósito no Oeste Africano	41
Figura 2.10 Relação entre peso específico medido e atrito lateral	42
Figura 2.11 Peso específico saturado: calculado versus medido	45
Figura 2.12 Gráficos de correlações positivas (a) e negativas (b)	49
Figura 2.13 Gráficos de dados para diferentes valores de R	50
Figura 2.14 Gráfico Q-Q Plot para apresentar normalidade	53
Figura 4.1 Correlação entre parâmetros do banco de dados	67
Figura 4.2 Correlações entre parâmetros do banco de dados e valores correspondentes	68
Figura 4.3 Gráfico quantil-quantil demonstrando a normalidade dos dados na Equação Modelo 4.1, com uso do intercepto	74
Figura 4.4 Gráfico quantil-quantil demonstrando a normalidade dos dados na Equação Modelo 4.3, com uso do intercepto	74
Figura 4.5 Gráfico quantil-quantil demonstrando a normalidade dos dados na Equação Modelo 4.5, sem uso do intercepto	75
Figura 4.6 Gráfico quantil-quantil demonstrando a normalidade dos dados na Equação Modelo 4.7, sem uso do intercepto	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Peso específico natural para diferentes tipos de solo.....	21
Tabela 2 – Peso específico aparente seco para solos naturais.....	23
Tabela 3 – Valores de densidade real dos grãos em diferentes tipos de solo	26
Tabela 4 - Valores adotados para método	44
Tabela 5 - Resultados de múltiplos métodos.....	45
Tabela 6 - Resumo das propostas apresentadas na literatura para solos naturais...	55
Tabela 7- Resumo do banco de dados de desenvolvimento	65
Tabela 8 - Resumo do banco de dados de validação.....	65
Tabela 9 - Resultados obtidos na verificação das equações e banco de validação..	66
Tabela 10 - Resumo das equações modelo propostas neste estudo	73
Tabela 11 - Resultados obtidos na verificação dos modelos de equação considerando o intercepto.....	76
Tabela 12 - Resultados obtidos na verificação dos modelos de equação sem considerar o intercepto	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CPT	Cone Penetration Test
CPTu	Piezocone Penetration Test
IQR	Inter-Quartil
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
SBT	Soil Behaviour
SC	Santa Catarina
SCPTu	Seismic Cone Penetration Test
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

q_c	Resistência de ponta
q_t	Resistência de ponta corrigida
f_s	Atrito lateral
u	Poropressão
u_2	Poropressão na base do cone
u_0	Poropressão hidrostática
R_f	Razão de atrito
B_q	Parâmetro de poropressão
γ_t	Peso específico do solo
σ_{vm}	Tensão total
σ'_{v0}	Tensão efetiva
σ'_{vm}	Tensão de pré adensamento
σ'_p	Histórico de tensões
Su	Resistência não drenada
OCR	Razão de pré adensamento
ϕ	Ângulo de atrito
I_c	Índice de classificação do material
V_s	Velocidade de onda cisalhante
V_{s1}	Velocidade de onda cisalhante normalizada
G	Densidade real dos grãos
e	Índice de vazios
Q_t	Resistência de ponta normalizada pela tensão total
Fr	Razão normalizada do atrito
Ch	Coeficiente de adensamento horizontal
Cv	Coeficiente de adensamento vertical
p_a	Pressão atmosférica
ln	Logaritmo neperiano
log	Logaritmo
m_q	Razão entre resistência de ponta corrigida e a profundidade
w	Umidade

NA	Nível d'agua
R	Coeficiente de correlação linear de Pearson
R^2	Coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral.....	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	PESO ESPECÍFICO DO SOLO.....	20
2.1.1	Peso específico natural	20
2.1.2	Peso específico aparente seco	23
2.1.3	Peso específico saturado	24
2.1.4	Peso específico submerso	24
2.1.5	Peso específico dos sólidos e densidade real dos grãos (G)	25
2.2	ENSAIO CPT E CPTU.....	27
2.3	PROPOSTAS DE ESTIMATIVA DO PESO ESPECÍFICO NATURAL DO SOLO	31
2.3.1	Proposta de Mayne (2001)	31
2.3.2	Proposta de Mayne (2007)	33
2.3.3	Proposta de Robertson e Cabal (2010)	35
2.3.4	Proposta de Mayne e Peuchen (2012).....	38
2.3.5	Proposta de Mayne (2014)	41
2.3.6	Proposta de Lengkeek, de Greef e Joosten (2018)	42
2.4	ESTATÍSTICA NA ENGENHARIA	46
2.4.1	Análise de regressão linear	47
2.4.1.1	<i>Transformação</i>	48
2.4.2	Correlação	48
2.4.3	Análises de observações influentes	51
2.4.3.1	<i>Multicolinearidade</i>	51
2.4.3.2	<i>Outliers.....</i>	52
2.4.4	Normalidade dos dados	52
2.4.5	Validação	54
2.5	RESUMO DO CAPÍTULO	54

3	METODOLOGIA	57
3.1	BANCO DE DADOS	57
3.1.1	Concepção e montagem do banco de dados	58
3.2	VERIFICAÇÃO DE PROPOSTAS DE ESTIMATIVA DE PESO ESPECÍFICO EXISTENTES NA LITERATURA.....	60
3.3	<i>SOFTWARE R STUDIO</i>	61
3.4	PROPOSTA DE MODELO DE EQUAÇÃO.....	61
3.5	VALIDAÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1	BANCO DE DADOS	64
4.2	VERIFICAÇÃO DAS PROPOSTAS EXISTENTES.....	66
4.3	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DO BANCO DE DADOS	67
4.4	ANÁLISE DOS MODELOS DE EQUAÇÃO	69
4.4.1	Modelagem das equações	69
4.4.1.1	<i>Equações modelo</i>	69
4.4.2	Intercepto	71
4.4.2.1	<i>Equações modelo sem intercepto</i>	72
4.4.3	Normalidade nos modelos de equação	73
4.5	VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE EQUAÇÃO	76
4.6	COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
5.1	CONCLUSÕES	78
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	82
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Uma investigação geotécnica adequada é necessária para o entendimento do comportamento do solo e ocupa um espaço fundamental na engenharia. Ela é geradora de dados geotécnicos de laboratório e campo, os quais permitem ao projetista a previsão do comportamento do maciço de solo estudado, oferecendo mais segurança para o desenvolvimento de projetos de fundações, rodovias, estabilidade de taludes e outros.

Segundo Lunne, Robertson e Powell (1997), os ensaios de campo e laboratório se complementam entre si, entretanto, os ensaios de campo apresentam alguns atrativos. Além de se destacarem em relação ao fator econômico, os ensaios de campo permitem a obtenção de um grande número de informações num menor período de tempo, permitem avaliar as características do solo em seu estado natural e possibilitam estimar a variabilidade espacial de um depósito.

Os ensaios de penetração de cone (CPT) e piezocone (CPTu) são realizados através da cravação no solo de um conjunto de hastes de aço e uma ponta cônica, com o auxílio de um sistema de reação montado na superfície do terreno. Neste ensaio são medidas continuamente as grandezas: resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s) e a poropressão gerada (u_2). A combinação destes valores com o conhecimento da variação das tensões totais e efetivas ao longo da profundidade permite determinar parâmetros utilizados para a avaliação do comportamento do solo. A utilização de sistemas de classificação de solos [Robertson e Campanella (1983); Robertson et al (1986); Robertson (1990); Jefferies e Davies (1993)], baseados em intervalos característicos destes parâmetros, possibilita a caracterização da estratigrafia do terreno em estudo.

A literatura apresenta diversas correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos a partir de resultados de ensaios CPTu [Kulhawy e Mayne (1990); Schmertmann (1978); Teh e Houlsby (1991); Larsson e Mulabdic (1991)], no entanto, uma das informações essenciais na interpretação do ensaio é o valor do peso específico natural do solo. Com o uso cada vez mais intenso de

programas e planilhas de cálculo dedicados à interpretação dos ensaios de cone, esta informação se torna muito importante para a avaliação da tensão total (σ_{v0}) e efetiva (σ'_{v0}) de um perfil geotécnico (Robertson e Cabal, 2010), bem como na acurada determinação de seus parâmetros subsequentes.

Em etapas subsequentes da interpretação dos dados do ensaio de cone, o cálculo de tensões baseado nos valores de γ_t afeta o valor da resistência líquida do piezocone ($q_t - \sigma'_{v0}$). Esta resistência, por sua vez, governa parâmetros normalizados usados nos sistemas de classificação do comportamento dos solos, como por exemplo: $Q_t = (q_t - \sigma_{v0})/\sigma'_{v0}$; $F = 100 \cdot \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})}$; $B_q = (u_2 - u_0)/(q_t - \sigma_{v0})$. Além disso, o valor do peso específico apresenta interferência na determinação de outros parâmetros como a resistência não drenada (s_u), OCR, módulo de deformabilidade (E), módulo oedométrico (D), ângulo de atrito (ϕ) entre outros parâmetros, conforme citam Lunne, Robertson e Powell (1997), Schnaid (2009), Mayne (2007) e Robertson (2009).

Os métodos apresentados pela literatura para determinação de γ_t a partir de resultados do ensaio de cone utilizam a resistência de ponta (q_t), o atrito lateral (f_s) e alguns o valor da velocidade da onda cisalhante (V_s) através do solo. Estes métodos consistem em formulações empíricas desenvolvidas a partir de banco de dados de solos naturais, englobando geralmente uma faixa de valores de densidade real dos grãos (G), variando geralmente entre 2,5 e 2,7 (MAYNE, 2007). Algumas propostas específicas buscam atender solos orgânicos, para valores de G variando de 1,45 a 2,33 (LENGKEEK, de GREEF e JOOSTEN, 2018). Todavia, considerando-se a extensa aplicabilidade dos ensaios de cone, englobando tanto depósitos de solos moles, quanto de rejeitos de mineração, existe a necessidade de avaliação de correlações para estimativa do peso específico para faixas mais amplas de valores de densidade real dos grãos, para os quais as correlações disponíveis na literatura podem apresentar limitações.

Neste contexto, o presente estudo consiste na compilação e organização de um banco de dados de resultados de ensaios de cone e ensaios de laboratório, englobando solos com uma ampla faixa de valores de densidade real dos grãos (1,3 a 4,5). A partir deste banco de dados pretende-se verificar a aplicabilidade de relações de estimativa de peso específico existentes e estudar

novas correlações entre os dados disponíveis para obtenção do peso específico dos solos. O estudo será embasado em análises estatísticas com auxílio do *software* estatístico *R Studio*.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar correlações para estimativa do peso específico natural do solo a partir de resultados de ensaios CPTu.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Elaborar e organizar um banco de dados a partir de resultados de ensaios de cone e ensaios de laboratório, definindo parâmetros utilizados nas correlações;
- b) Analisar as propostas de estimativa de peso específico fornecidas por equações disponíveis na literatura;
- c) Avaliar possível ou possíveis, modelos de equação para determinação de peso específico através de dados CPTu, com base no banco de dados elaborado, utilizando *software* estatístico;

1.3 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho foi dividido em cinco capítulos, dando uma sequência lógica ao desenvolvimento da pesquisa. Neste primeiro capítulo é feita uma breve introdução ao assunto, sua relevância e justificativa bem como os objetivos definidos para atingir o resultado final esperado. Além deste apresentam-se os demais capítulos:

- a) Segundo capítulo: é feita uma revisão bibliográfica sobre os assuntos mais relevantes a pesquisa. Dentre eles destacam-se o peso específico do solo, o ensaio CPT e CPTu, seu processo de

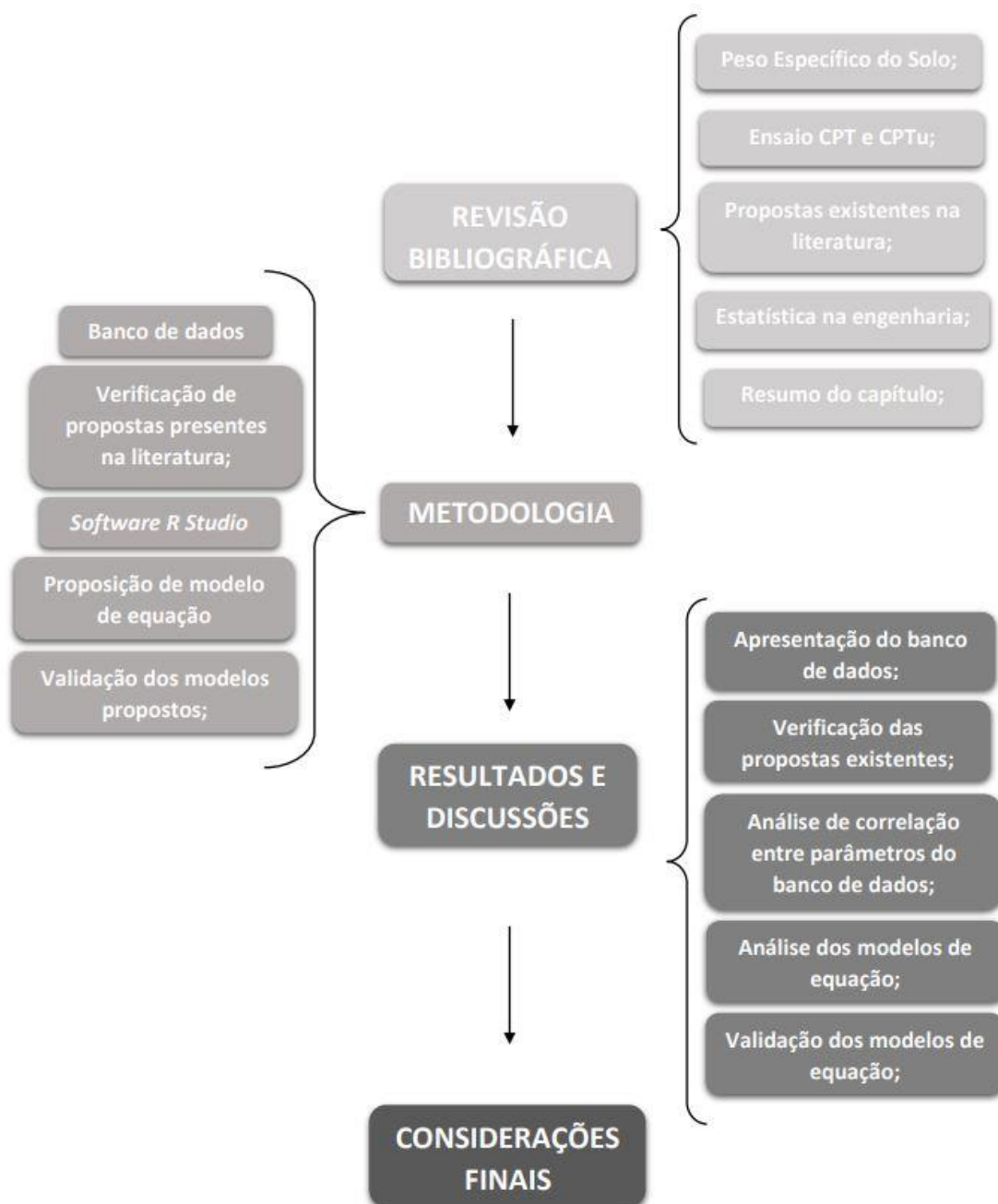
execução e obtenção de resultados, apresentação das correlações existentes para estimativa do peso específico de solos naturais e o uso da estatística na engenharia;

- b) O terceiro capítulo abrange a metodologia da pesquisa, apresentando a forma como foi elaborado o banco de dados, os parâmetros escolhidos e tratamento estatístico efetuado;
- c) No quarto capítulo deste trabalho serão apresentados os resultados das análises realizadas, bem como, o estudo de correlação(ões) para estimativa do peso específico do solo a partir de resultados de ensaios CPTu, com base no banco de dados estudado;
- d) O quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas com o trabalho e expõe sugestões para projetos futuros.

Ao final do trabalho constam as referências bibliográficas para que se fizesse possível o desenvolvimento do estudo.

A Figura (1.1) apresenta de forma esquemática, a estrutura do presente estudo.

Figura 1.1 Estrutura do trabalho



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo discute conceitos que contribuem para o entendimento global da pesquisa. Em um primeiro momento serão abordados aspectos relacionados ao peso específico do solo. Em seguida são discutidos os ensaios CPT/CPTu seus resultados e interpretação. Posteriormente são apresentadas e discutidas as correlações disponíveis na literatura para estimativa do peso específico do solo a partir de resultados de ensaio de cone e, por fim, discute-se o uso da estatística na engenharia.

2.1 PESO ESPECÍFICO DO SOLO

Para qualquer projeto geotécnico é necessário que se conheça as tensões do solo, tensão efetiva e tensão total. Para obtenção destas tensões deve-se primeiramente conhecer o peso específico deste solo, mas a obtenção deste valor nem sempre é trivial e consome tempo e dinheiro o que leva a busca por outras formas de determinação como por dados diretos de ensaio de cone.

2.1.1 Peso específico natural

Este índice se dá pela relação entre o peso total (P), dado em kN/m^3 , do solo (partículas sólidas + água) e seu volume total (partículas sólidas + água + ar), conforme Equação (1). O peso específico natural é expresso pelo símbolo γ_t ou somente γ e também pode ser chamado apenas de “peso específico” do solo (DAS e SOBHAN, 2014).

$$\gamma_t = \frac{P}{V} \quad (1)$$

O peso unitário do solo em suas condições naturais é um dos parâmetros fundamentais na interpretação dos resultados do ensaio do cone (CPT) ou do piezocone (CPTu). Com base neste parâmetro se torna possível determinar a

distribuição de tensões ao longo da profundidade provocada pelo peso próprio (ROBERTSON, 2010). Dentre as formas possíveis de se determinar o peso específico natural do solo, está o método direto, quando existe a possibilidade de retirada de amostra indeformada, normatizada pela ABNT/NBR 9813/2016 ou pela ABNT/NBR 9820/1997. Outra forma é a determinação indireta através de correlações empíricas com base nas medições de ensaios como CPTu. A obtenção deste valor nem sempre é trivial e consome tempo e dinheiro sendo a sua determinação efetuada a partir dos dados diretos do ensaio do cone muito atrativa.

A literatura apresenta várias proposições de correlações que podem ser usadas para estimativa do peso específico natural, dentre elas pode-se citar Mayne (2001); Mayne (2007); Robertson e Cabal (2010); Mayne e Peuchen (2012); Mayne (2014) e Lengkeek (2018). Estas correlações serão apresentadas e discutidas com maiores detalhes no item 2.3 deste trabalho. Os valores obtidos para o peso específico natural são repetidamente utilizados e aplicados em interpretações que dão sequência à determinação de importantes propriedades de um solo. Quando um valor é adotado ou estimado incorretamente, pode afetar parâmetros que colocam em risco a segurança e viabilidade de um projeto geotécnico, tais como a deformabilidade e resistência do solo (BAGINSKA, 2016).

Na Tabela (1), apresentam-se valores de peso específico natural para diferentes tipos de solo.

Tabela 1 - Peso específico natural para diferentes tipos de solo

(continua)				
	Localidade	Tipo de solo	Peso específico natural (kN/m ³)	Referência
	Amsterdam	Argila orgânica e turfa	10,05 – 21,33	Lengkeek, de Greef e Joosten (2018)
Argilas orgânicas e turfás	Polônia	Turfa, gyttja e lama orgânica	13,43 – 13,47	Rabarijoely (2019)
	Indonésia	Turfa Fibrosa	9,71	Faisal <i>et al</i> (2019)
	Planícies de Santos (SP)	Argila	13,5 – 15,5	Almeida e Marques (2014)

(continuação)				
	Localidade	Tipo de solo	Peso específico natural (kN/m ³)	Referência
Solos Naturais	Porto de Rio Grande (RS)	Argila	15 – 17,8	Robertson e Cabal (2010)
	Recife (PE)	Argila	15,1 – 16,4	
	Barra da Tijuca e Recreio (RJ)	Argila	10,01 – 16,9	
	McDonald's Farm – Canadá	Areia deltaica	17 – 19	
	Cooper Marl, Estados Unidos	Silte cimentado rijo	18	
	Bangkok – Thailand	Argila	15 - 17	
	Madingley, Reino Unido	Argila muito rija	19 - 20	
	Holmen, Noruégia	Areia	17 - 18	
	Georgia Piedmont – Estados Unidos	Areia siltosa para silte arenoso – Solo residual	16 - 18	
	-	Areia com pedregulho	19 - 24	
	-	Areia fina e uniforme	18 - 21	
	-	Silte	18 - 22	
	-	Argila	14 - 23	
	-	-	-	
Rejeito de mineração	São Luiz (MA)	Bauxita	15,62 – 23,7	Bedin (2006)
	Região Norte do Brasil	Lama de Bauxita	10,92 – 18,57	Villar (2002)
	Mina Córrego do Feijão (MG-Brasil)	Ferro	18,1 – 22,4	Silva (2010)
	Quadrilátero ferrífero – MG	Ferro	15,4 – 19,2	Albuquerque Filho <i>et al.</i> (2004)
	Juiz de Fora (MG)	Zinco	11,27 – 14,92	Hlenka (2012)
	São Luiz (MA)	Bauxita	17,3 – 18,4	Nierwinski <i>et al</i> (2020)
	Teofilândia (BA)	Ouro	15,6	Nierwinski <i>et al</i> (2020)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

2.1.2 Peso específico aparente seco

Este índice reflete o peso específico que o solo teria se ficasse seco, sem alteração de volume e é dado pela Equação (2) (PINTO, 2006). Ele varia em função da porosidade do solo e conseqüentemente a isto, varia em função de todas as propriedades que se relacionam a este índice. Ele demanda de um procedimento de extrema dificuldade se tornando pouco praticável, todavia equações relacionadas entre os demais índices físicos permitem sua determinação (LAMBE e WHITMAN, 1969). Como demonstrado na relação dada pela Equação (3).

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V} \quad (2)$$

$$\gamma_d = \frac{G}{1+e} \gamma_w = \frac{G\gamma_w}{1+w \frac{G}{S}} = \frac{\gamma_t}{1+w} \quad (3)$$

em que γ_w é o peso específico da água, em kN/m³, w é o teor de umidade, dado em porcentagem, S que é o grau de saturação e G , que é a densidade real dos grãos.

Na Tabela (2), valores de peso específico aparente seco são apresentados para solos naturais.

Tabela 2 – Peso específico aparente seco para solos naturais

(continua)		
Tipo de Solo	Peso específico aparente seco γ_d (kN/m ³)	Referências
Areia (Turquia)	16,47- 21,58	Kolay e Baser (2014)
Argila e silte (Turquia)	13,22 – 17,83	
Silte descongelado (China)	15,3 – 17,3	Qi, Ma e Song (2008)
Areia uniforme	13,04 – 18,54	
Silte inorgânico	12,57 – 18,54	Lambe e Whitman (1969)
Areia siltosa e cascalho	13,98 – 22,93	
Argila dura	17	

(continuação)

Tipo de Solo	Peso específico aparente seco γ_d (kN/m ³)	Referências
Argila fofa	11,5 – 14,5	Das e Sobhan (2013)
Argila orgânica mole	6 – 8	
Argila siltosa	15,5	Mascarenha (2008)
Gnaisse	15,6	Cardoso Júnior (2006)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

2.1.3 Peso específico saturado

É o peso específico do solo em condição saturada (todos os vazios preenchidos por água), sem alteração de volume. É representado pelo símbolo γ_{sat} e geralmente apresenta valores da ordem de 20 kN/m³. O peso específico saturado pode ser obtido através da Equação (4) (PINTO, 2006). Quando obtido através de outros índices físicos, se dá através da Equação (5).

$$\gamma_{sat} = \frac{P_{sat}}{V} \quad (4)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_{s+e} \gamma_w}{1+e} \quad (5)$$

2.1.4 Peso específico submerso

Utilizado como um artifício para cálculo das tensões efetivas de forma direta, é o peso específico efetivo do solo quando este se apresenta submerso. É dado pelo peso específico natural menos o peso específico da água, como pode ser verificado na Equação (6).

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (6)$$

2.1.5 Peso específico dos sólidos e densidade real dos grãos (G)

Segundo Lambe e Whitman (1969), o peso específico dos sólidos, dado pela relação entre o peso das partículas sólidas (P_s) e o volume destas partículas (V_s), conforme demonstra a Equação (7). O peso específico dos sólidos é expresso pelo símbolo γ_s e pode ser determinado em laboratório através do uso de picnômetro, sendo seu ensaio normatizado pela ABNT/NBR 6458 (2017) e decorrente da pesquisa DNER-ME 093 (1994).

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s} \quad (7)$$

A densidade real dos grãos é uma forma de expressar o peso específico dos sólidos de forma adimensional, onde tem-se a razão entre o peso específico dos sólidos (γ_s) e o peso específico da água (γ_w), conforme Equação (8).

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (8)$$

O peso específico dos sólidos varia conforme o tipo de solo, e da mesma forma isso ocorre para a densidade real dos grãos, a qual depende principalmente dos constituintes mineralógicos de um solo. Este parâmetro, quando considerado para solos naturais, varia de 2,5 a 2,7 (ROBERTSON, 2010). Porém, uma gama de solos acaba ficando fora desta faixa, dentre eles estão os solos com muita matéria orgânica e os resíduos de mineração (LENGKEEK, de GREEF e JOOSTEN, 2018). Os resíduos oriundos da mineração, apresentam valores bem acima desta média devido a serem altamente dependentes da mineralogia da rocha originária (VILLAR, 2002).

Na Tabela (3), apresentam-se alguns valores de densidade real dos grãos de uma gama de solos, desde solos naturais, solos orgânicos e solos de rejeitos de mineração.

Tabela 3 – Valores de densidade real dos grãos em diferentes tipos de solo

			(continua)
	Tipo de solo	<i>G</i>	Autores
Argila orgânica e turfas	Argila orgânica e Turfa	1,45 – 2,33	Lengkeek, de Greef e Joosten (2018)
	Turfa hêmica e sáprica	1,42 – 2,49	Duzzioni (2010)
	Turfa	1,19 – 1,81	Yusa <i>et al</i> (2020)
	Turfas (Wisconsin)	1,41 – 1,94	Das e Sobhan (2013)
Solos Naturais	Areia de Osório	2,63	Consoli <i>et al</i> (2009)
	Areia de Coimbra	2,65	Santos <i>et al</i> (2012)
	Quartzo	2,65	
	Feldspato potássico	2,54 – 2,57	
	Feldspato sódico cálcico	2,62 – 2,76	
	Calcita	2,72	
	Dolomita	2,85	
	Muscovita	2,7 – 3,1	Lambe e Whitman (1969)
	Biotita	2,8 – 3,2	
	Clorita	2,6 – 2,9	
	Pirofilita	2,84	
	Caulinita	2,61 – 2,64	
	Haloisita	2,55	
	Ilita	2,60 – 2,86	
Rejeitos de mineração	Bauxita (Jamaica)	2,9 – 3,0	
	Bauxita (África)	2,9 – 3,0	Stinson (1981)
	Bauxita (Austrália)	2,7 – 2,9	
	Bauxita (Alabama)	2,84 – 3,16	Somogyi e Gray (1977)
	Bauxita SL (Brasil)	3,0 – 3,7	Villar (2002); Rodrigues e Moura (1992); Pedrosa (1999); e Alves (1992)
	Bauxita PC (Brasil)	2,95	Villar (2002)
	Bauxita OC (Brasil)	3,59	Villar (2002)

(continuação)

	Tipo de solo	G	Autores
	Bauxita	3,06	Nierwinski (2019)
	Ouro	2,86	Nierwinski (2019)
	Ouro	2,89 – 2,93	Costa Filho, Santos e Palma (2002)
Rejeito de Mineração	Ouro	3,0	Bedin (2010)
	Zinco	3,28 – 3,37	Hlenka (2012)
	Zinco	3,25	Nierwinski (2019)
	Ferro	3,0 – 3,23	Hu <i>et al.</i> (2017)
	Ferro	3,1	Morgenstern <i>et al.</i> (2016)
	Ferro	3,16 – 5,0	Albuquerque Filho <i>et al.</i> (2004)
	Ferro	4,02 – 5,11	Silva (2010)
	Ferro	5,25	Milonas (2006)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Quando se interpretam resultados de ensaio de cone com base em correlações para estimativa de peso específico natural de solos, aplicados para solo não convencionais, erros podem ser efetuados (LENGKEEK, de GREEF e JOOSTEN, 2018).

2.2 ENSAIO CPT E CPTu

Os ensaios de cone e piezocone, CPT (*cone penetration test*) e CPTu (*piezocone penetration test*), respectivamente, são considerados internacionalmente como ferramentas fundamentais nas investigações geotécnicas. Um dos principais atrativos do ensaio é o registro contínuo da resistência à penetração, fornecendo uma descrição detalhada da estratigrafia do subsolo, informação essencial à composição de custos de um projeto geotécnico. A sofisticação do equipamento com a coleta de dados efetuada por meio de um sistema de aquisição de dados elimina a influência do operador nas medidas de ensaio (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

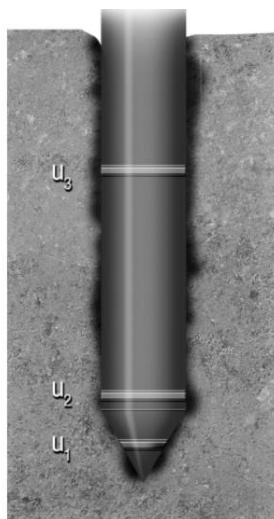
O ensaio é normatizado nacionalmente pela ABNT/NBR 12069/1991, que se encontra agora em fase de revisão e, internacionalmente pela ASTM D6064-

2020 e ISO 22476-1-2021, sendo que todas atendem às recomendações prescritas na IRTP/ISSMFE-1988 (*International Reference Testing Procedure*).

A sondagem do cone consiste na cravação no solo de uma sonda com uma ponta cônica de 60° de ápice, à uma velocidade constante de 20mm/s ($\pm$ 5mm/s). Existem no mercado cones com 2, 10, 15 e 40 cm² de seção de área da ponta, sendo a adotada como padrão de referência a de 10 cm² (ROBERTSON, 2014). Sondas mais esbeltas são indicadas para solos menos resistentes e locais de maior dificuldade de acesso a pessoas e equipamentos, não exigindo um robusto sistema de reação, como por exemplo, investigações realizadas no fundo do leito marinho. Já as sondas mais robustas, que requerem um sistema de reação com maior lastro ou sistemas de ancoragem, são indicadas para solos mais resistentes.

No ensaio CPTu, além das medidas da resistência de ponta e atrito lateral, o ensaio fornece medidas de poropressão ao longo da profundidade. Schnaid (2009) apresenta que variações na posição do elemento poroso, responsável pela medida da poropressão, podem ser utilizadas, sendo que a posição localizada imediatamente após à ponta cônica geralmente é adotada como padrão, e é denominada de u_2 . As posições u_1 , localizada na face da ponta cônica, e u_3 , localizada imediatamente após a luva, também são possíveis, mas não tão usuais a nível comercial na prática da engenharia. Figura (2.1).

Figura 2.1 Localização das possíveis medições de poropressão



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012)

Segundo Robertson (2014), a sonda é cravada no solo com o auxílio de um sistema hidráulico acionado por um motor elétrico ou à combustão. Este sistema pode estar montado sobre um chassi de caminhão, esteira ou até mesmo sobre um reboque. Variações destes sistemas possibilitam o acesso aos mais distintos e remotos pontos de ensaio.

Neste ensaio são medidas continuamente três grandezas físicas: tensão de ruptura do solo identificada pela resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s) e poropressão (u). No caso de medidas de poropressão na posição u_2 , em decorrência de áreas desiguais entre a ponta cônica e a área imediatamente após a mesma, o valor de q_c deve ser corrigido pela Equação (9). O valor de q_c , assim corrigido, passa a ser denominado de resistência de ponta corrigida (q_t) (SCHNAID E ODEBRECHT, 2012).

$$q_t = q_c + (1 - a) \cdot u_2 \quad (9)$$

em que q_c é a resistência de ponta, em kPa, a é a razão entre área da ponteira na base do cone e área total (diâmetro do cone) e u_2 é a poropressão na base do cone, em kPa.

Robertson (1990), apresenta que, através dos valores acima descritos, é possível determinar os parâmetros normalizados do CPTu, sendo eles: Q_t , resistência de ponta normalizada; F_r , resistência de atrito normalizada e B_q , parâmetro de poropressão normalizado ou somente parâmetro de poro pressão, conforme demonstram as Equação (10), (11) e (12), respectivamente.

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{(\sigma_{vo} - u_0)} \quad (10)$$

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{vo})} \cdot 100\% \quad (11)$$

$$B_q = \frac{(u_2 - u_0)}{(q_t - \sigma_{vo})} \quad (12)$$

em que q_t é a resistência de ponta corrigida dado em kPa, u_2 é a poropressão na base do cone e u_0 é a pressão hidrostática ambas em kPa, σ_{vo} é a tensão vertical *in situ*, e por fim f_s é o atrito lateral do cone, também em kPa.

Acrescenta-se a estes parâmetros normalizados o valor da resistência de ponta líquida ($q_{t(net)}$) definida pela diferença entre a resistência de ponta corrigida e tensão vertical total, conforme apresenta-se na Equação (13).

$$q_{t(net)} = q_t - \sigma_{vo} \quad (13)$$

A partir das grandezas acima definidas é possível a interpretação dos resultados do piezocone tanto no que se refere a determinação do seu comportamento com base no SBT (*Soil Behaviour Type*), bem como, na estimativa de parâmetros de resistência [s_u (resistência não drenada); ϕ' (ângulo de atrito interno efetivo); parâmetros de deformação [D (módulo oedométrico), E (módulo de deformabilidade)], G_o (módulo cisalhante), entre outros); parâmetros de permeabilidade [k (coeficiente de permeabilidade)], c_h (coeficiente de adensamento horizontal), histórico de tensões (OCR, que é a razão de pré-adensamento) e σ'_p (tensão de pré-adensamento)]. As equações que permitem a interpretação dos resultados são geralmente obtidas com base em conceitos teóricos da mecânica dos solos, definidas a partir de correlações empíricas embasadas estatisticamente, métodos numéricos e definidas a partir de ensaios conduzidos em câmara de calibração (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Os resultados do ensaio são geralmente apresentados em forma de gráficos onde os valores lidos ou interpretados são representados no eixo das abcissas e a profundidade no eixo das ordenadas.

Com o desenvolvimento tecnológico e a evolução nos sistemas de aquisição e digitalização de dados, sensores foram incorporados junto à sonda do CPT. Dentre estes sensores adicionados destaca-se o geofone, que permite a determinação do tempo de chegada da onda cisalhante (V_s), que se propaga no solo em decorrência de um estímulo sísmico. Assim, concomitantemente com a obtenção da resistência de ponta, atrito lateral e poropressão, o piezocone pode registrar a velocidade da onda cisalhante, geralmente a cada metro de profundidade de investigação (Campanella *et al*, 1986; Mayne, 2007).

2.3 PROPOSTAS DE ESTIMATIVA DO PESO ESPECÍFICO NATURAL DO SOLO

Conforme descrito acima, para a interpretação dos resultados do CPT e do piezocone tem-se a necessidade da estimativa da tensão vertical total (σ_{v0}) e efetiva (σ'_{v0}). Para tanto é fundamental a determinação do valor do peso específico natural do solo em diversos pontos ao longo da profundidade. Geralmente este valor é obtido através de ensaios laboratoriais efetuados sobre amostras coletadas em campo. Contudo, no caso do ensaio de cone, onde não se procede a coleta de amostras concomitante com a realização da sondagem, a estimativa deste parâmetro passa a ter importância fundamental.

Assim, ao longo dos tempos, com a evolução das metodologias de interpretação do ensaio do cone, propostas que estimam o peso específico natural também foram desenvolvidas. Na sequência desta revisão bibliográfica apresentam-se algumas destas propostas mais utilizados na prática da engenharia geotécnica.

2.3.1 Proposta de Mayne (2001)

A proposta de Mayne (2001) apresenta um equacionamento para a estimativa de peso específico saturado (γ_{sat}). O equacionamento baseia-se no valor da velocidade da onda cisalhante, o qual pode ser obtido através de ensaios de cone sísmico (SCPTu). Este equacionamento foi apresentado pelo autor com o intuito de obter o módulo de cisalhamento máximo G_{max} , a partir de valores de V_s , o qual depende do peso específico do solo. De acordo com Mayne, Peuchen e Bouwmeester (2010) a velocidade da onda de cisalhamento pode ser relacionada ao peso específico uma vez que esta depende fortemente de propriedades que afetam o peso específico, como por exemplo o índice de vazios, estado de tensões, estrutura, cimentação e envelhecimento.

A proposta de equacionamento de Mayne (2001) baseou-se no estudo preliminar de Burns & Mayne (1996) que expressa o peso específico como uma função de potência em termos de tensão efetiva e velocidade da onda de cisalhamento, Equação (14). Estes autores utilizaram um número de

observações igual a 438 (n), obtendo um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,820 e um desvio padrão de 0,115 kN/m³. Estes conceitos serão melhor discutidos no item 2.4 deste trabalho.

$$\gamma_t = 6.87(V_s)^{0.227} (\sigma'_{v0})^{-0.057} \quad (14)$$

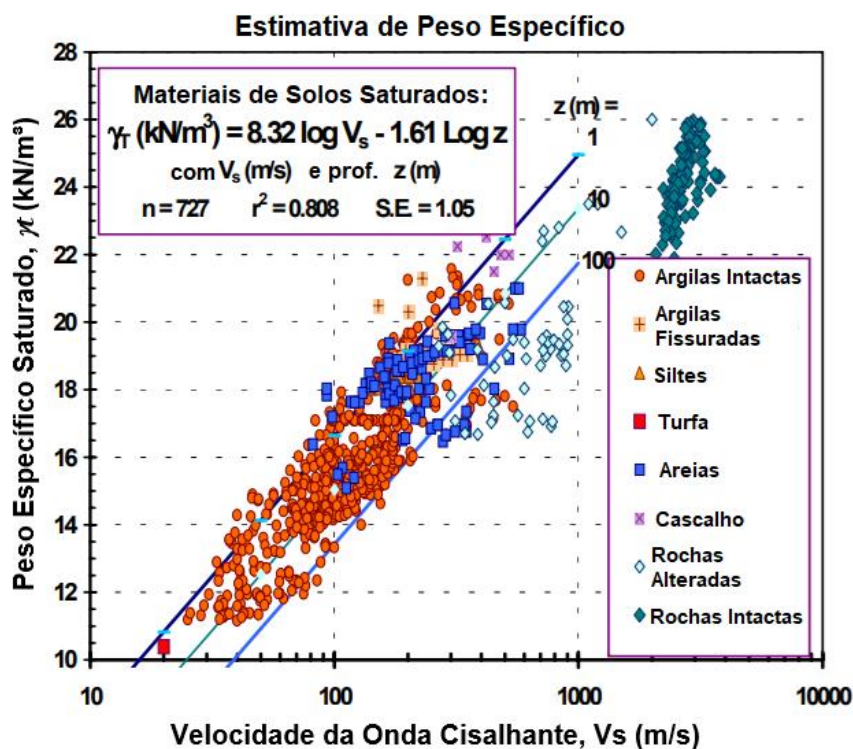
em que V_s é a velocidade de onda cisalhante, em m/s e σ'_{v0} é a tensão efetiva dada em kN/m².

Mayne (2001), apresenta a Equação (15) para estimativa do peso específico saturado. Para sua modelagem o autor recorreu a um banco de dados mais extenso, englobando 727 observações (n), com um compilado global de valores de velocidade de onda cisalhante, englobando diversos tipos de geomateriais saturados, desde argilas até pedregulhos e rochas. A Equação (15) apresenta a proposta de estimativa de γ_{sat} de Mayne (2001) obtida a partir de ajuste estatístico dos dados apresentados na Figura (2.2).

$$\gamma_{sat} = 8.32 \log (V_s) - 1.61 \log (z) \quad (15)$$

em que, V_s é a velocidade de onda cisalhante, em m/s e z é profundidade, dada em metros.

Figura 2.2 Correlação para peso específico através de velocidade de onda cisalhante e profundidade



Fonte: Adaptado Mayne (2001)

Observando a Figura (2.2) é possível verificar a correlação proposta com a utilização de valores de velocidade de onda cisalhante

Esta equação volta a ser apresentada nos trabalhos de Mayne, Peuchen e Bouwmeester (2010), Mayne (2014), onde é reafirmado que a proposta satisfaz o objetivo dos autores, quando se fazem disponíveis os valores de velocidade de onda, obtidos, por exemplo, através do ensaio SCPTu. Devido ao banco de dados ter sido montado para uma extensa gama de solos, o autor apresenta a correlação como forma geral para todos os tipos de solos não cimentados.

2.3.2 Proposta de Mayne (2007)

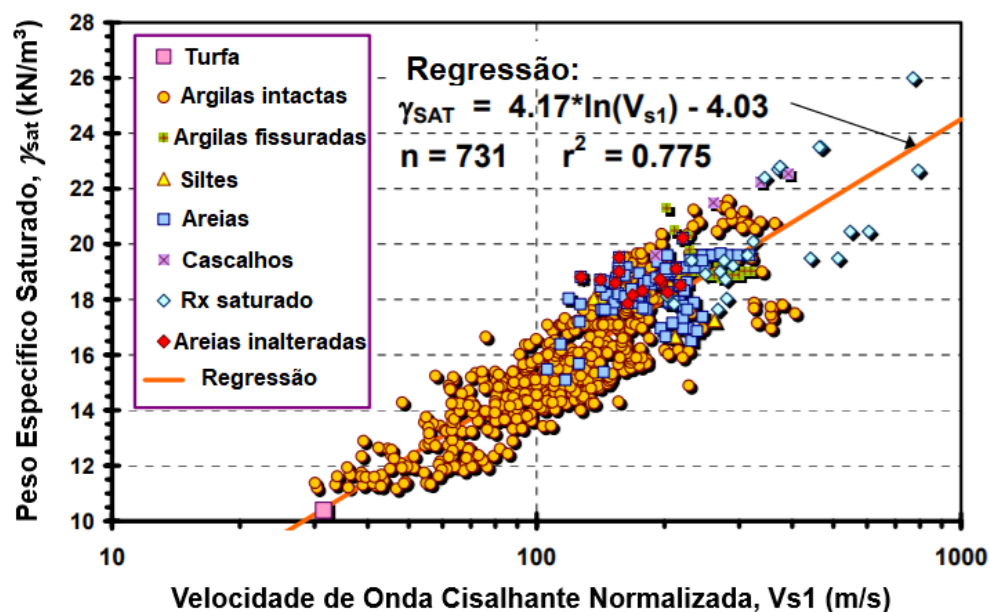
Esta proposta constitui uma versão alternativa a proposta de Mayne (2001), mas em termos da velocidade cisalhante normalizada pelo nível de tensões. A velocidade cisalhante normalizada é denominada de V_{s1} e é definida

como $V_{s1} = V_s \left(\frac{m}{s} \right) \left(\frac{\sigma'_{v0}}{pa} \right)^{0,25}$, onde pa é a pressão atmosférica, adotada como sendo igual a 100 kPa. O peso específico definido pela proposta de Mayne (2007) trata-se do peso específico saturado e pode ser obtido por meio da Equação (16):

$$\gamma_{sat} = 4.17 \ln(V_{s1}) - 4.03 \quad (16)$$

Esta equação, foi desenvolvida a partir de um banco de dados global de solos, composto por 731 observações (n) em solos chamados de “bem comportados” pelo autor. O peso específico saturado pode ser estimado a partir dos valores de V_{s1} , conforme indica a regressão apresentada na Figura (2.3), com uma variação de $\pm 1 \text{ kN/m}^3$. Na Figura (2.3) o autor também incluiu dados de 14 areias não perturbadas. De acordo com o autor, a equação proposta apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0,775 e o autor não apresenta dados relacionados ao erro padrão da regressão.

Figura 2.3 Avaliação de peso específico saturado a partir de valores de V_{s1} normalizados em solos não cimentados



Fonte: Adaptado de Mayne (2006)

Mayne (2007) comenta ainda que pesos específicos da ordem de 10 a 26 kN/m^3 são associados a valores de V_{s1} da ordem de 30 a 800 m/s.

Tem-se que um solo cimentado não necessariamente é mais poroso, mas o que se apresenta é que um solo não cimentado pode ter um peso específico igual a um solo cimentado, porém quando ocorre a cimentação o autor afirma que se tem um valor de velocidade maior, devido a isso, ele espera que os dados referentes a estes solos cimentados e carbonatados se localizem mais à direita do gráfico apresentado na Figura (2.3).

Para a utilização da Equação 16, a proposta do autor é assumir um valor inicial para o peso específico saturado do solo (γ_{sat}) tendo em vista que a tensão efetiva (σ'_{v0}) depende deste parâmetro. Quando comparada à proposta de Mayne (2001), o método tem como vantagem o fato de contabilizar as diferentes camadas dos perfis de solo, com maior ou menor densidade ao longo da profundidade.

2.3.3 Proposta de Robertson e Cabal (2010)

Esta proposta foi concebida utilizando resultados de ensaio CPT e fundamentalmente pela análise de outros métodos existentes na literatura onde o autor conecta distintos métodos, principalmente o método de determinação desenvolvido por Silvano Marchetti (Dilatômetro de Marchetti). Uma correlação resultante dessa análise com base somente em medidas diretas do cone (q_t ou q_c e f_s) é o propósito do método. O autor destaca que o método de Mayne (2007), apresentado anteriormente, tem como desvantagem a necessidade da medição de V_s , além de requerer algum processo iterativo.

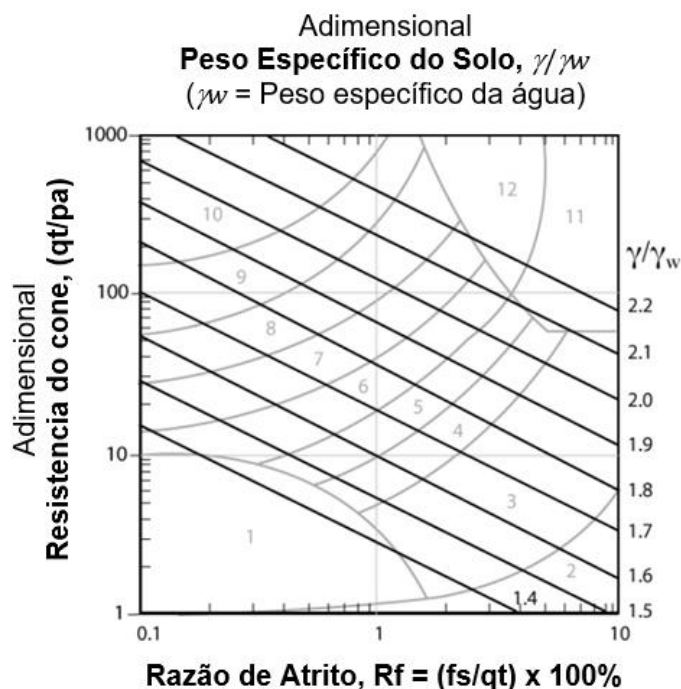
Para desenvolver a correlação proposta por Robertson e Cabal (2010), como pode-se ver na Equação (17), foram combinadas experiências e correlações entre a velocidade de onda e peso específico do solo (MAYNE, 2007), juntamente com relações entre o peso específico e resultados de ensaio DMT (MARCHETTI, 1980). Assim, Robertson e Cabal (2010) desenvolveram contornos aproximados de valores de peso específico em função de parâmetros adimensionais de resistência (q_t/pa) e atrito lateral ($Rf = \left(\frac{f_s}{q_t}\right) 100$) do cone, conforme mostra a Figura (2.4). A Equação (17) demonstra o cálculo do peso específico natural do solo, sendo γ_w o peso específico da água. Em análise à

Figura (2.4), Robertson e Cabal (2010) comentam que se verifica uma tendência esperada de aumento do peso específico em função dos aumentos dos valores de resistência de ponta e atrito lateral do cone. Os autores também incluíram nesta figura, os limites aproximados do sistema de classificação de comportamento de solos proposto por Robertson (1986).

$$\gamma/\gamma_w = 0.27 [\log R_f] + 0.36 \left[\log \left(\frac{qt}{pa} \right) \right] + 1.236 \quad (17)$$

em que, R_f é razão de atrito multiplicado por 100%, γ_w é o peso específico da água em kPa e pa é a pressão atmosférica também dado em kPa.

Figura 2.4 Relação proposta entre os resultados do CPT e o peso específico do solo



Fonte: Adaptado de Robertson e Cabal (2010)

Robertson e Cabal (2010) destacam que a grande maioria dos solos apresenta uma densidade real dos grãos (G) na faixa de 2,5 a 2,7. No entanto, os autores comentam que para o caso de solos com valores de G fora desta faixa, pode ocorrer alguma interferência na correlação proposta dada pela Equação (17). Sendo assim, os autores apresentaram um equacionamento no

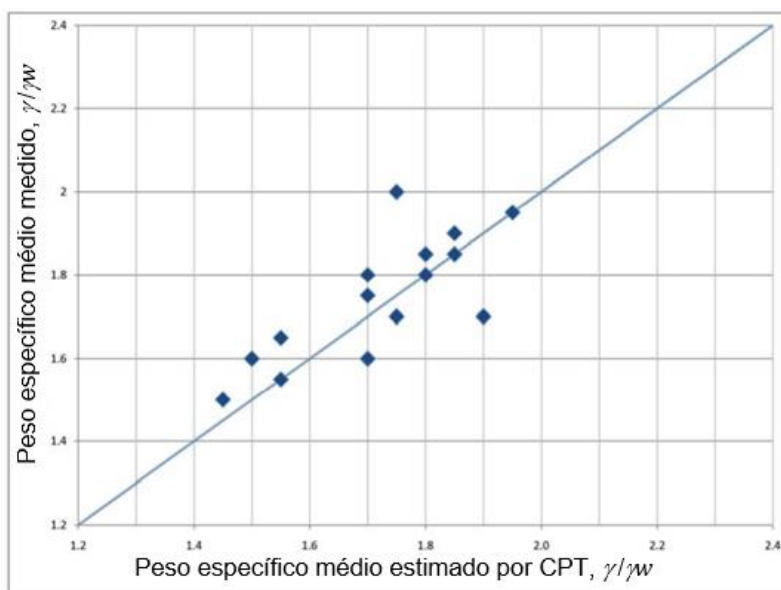
qual é introduzido o valor de G , permitindo uma estimativa mais abrangente do peso específico dos solos, conforme apresentado pela Equação (18):

$$\gamma/\gamma_w = \frac{[0.27 [\log R_f] + 0.36 [\log(\frac{qt}{pa})] + 1.236]G}{2.65} \quad (18)$$

Os autores fundamentaram sua proposta em uma análise de outras correlações já existentes e demais parâmetros para o desenvolvimento de um equacionamento empírico, sem o uso de um banco de dados para auxiliar nessa proposição.

Por fim os autores efetuaram uma análise da equação proposta aplicando a equação a alguns registros publicados. Dezoito locais distintos de solos predominantemente sedimentares foram considerados (areias deltaicas; areias fofas, médias e compactas; argilas moles, rijas e muito rígidas, assim como argilas sensíveis). Todavia concluíram que proposta é positiva e aplicável ao banco de dados estudado, conforme mostra a Figura (2.5).

Figura 2.5 Comparação entre os pesos unitários do solo medidos e os dados estimados pela correlação do método Robertson (2010)



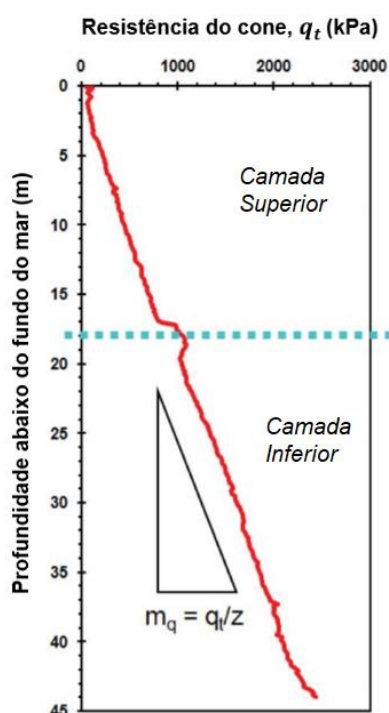
Fonte: Adaptado de Robertson e Cabal (2010)

2.3.4 Proposta de Mayne e Peuchen (2012)

Este equacionamento foi proposto considerando um banco de dados obtido em 19 locais *offshore* e 15 locais *onshore*, constituídos por argilas jovens normalmente consolidadas e levemente pré-consolidadas ($OCR < 2$). O banco de dados analisado por Mayne e Peuchen (2012) conta com resultados de ensaios CPTu e ensaios de laboratório, totalizando um total de 555 observações, sendo 399 *offshore* e 156 *onshore*.

A primeira avaliação dos autores consistiu em relacionar o peso específico dos materiais com o respectivo índice de plasticidade, verificando uma tendência de redução do peso específico com o aumento da plasticidade do material. Como o índice de plasticidade não é obtido por meio do ensaio de cone, os autores investigaram e identificaram uma relação entre o índice de plasticidade e a razão entre a resistência de ponta e a profundidade, denominada de m_q ($m_q = q_t/z$). O valor de m_q pode ser obtido de forma direta através da avaliação da inclinação da reta de tendência dos valores da resistência do cone com a profundidade, conforme demonstra a Figura (2.6).

Figura 2.6 Valores de resistência do cone com a profundidade



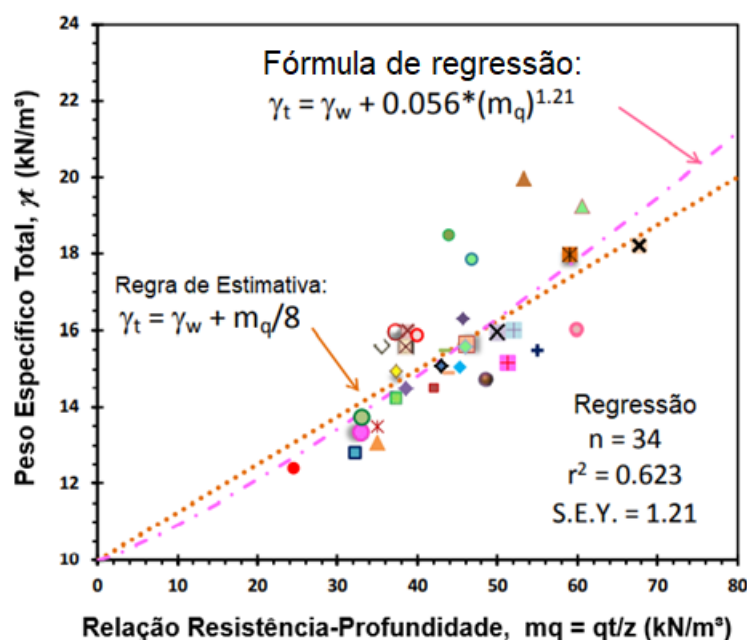
Fonte: Adaptado de Mayne e Peuchen (2013)

A Figura (2.7) apresenta os estudos realizados por Mayne e Peuchen (2012) para verificação da relação entre o peso específico e o parâmetro mq . A Equação (19) ilustra a regra de estimativa proposta pelos autores e a Equação (20) o equacionamento obtido pela regressão. Observa-se na Figura (2.7) que a regressão foi realizada com 34 observações (n), a partir das quais os autores obtiveram um coeficiente de determinação (R^2) de 0,623 e um desvio padrão de 1,21.

$$\gamma_t = \gamma_w + 0.056 (m_q)^{1.21} \quad (19)$$

$$\gamma_t = \gamma_w + \frac{m_q}{8} \quad (20)$$

Figura 2.7 Relação entre peso específico e parâmetro mq



Fonte: Adaptado de Mayne e Peuchen (2012)

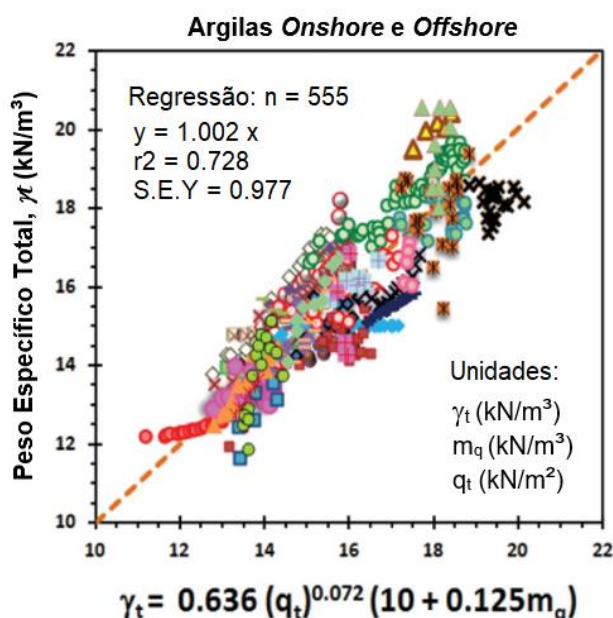
Após esta análise inicial, os autores realizaram uma regressão estatística utilizando todo o banco de dados, com as 555 observações. Os autores testaram diversas relações (aritmética, semi-log, logarítmica e de potência) buscando por tendências empíricas entre o peso específico do solo e medidas do ensaio CPTu. O equacionamento que forneceu os parâmetros estatísticos mais adequados

(coeficiente de determinação – R^2 de 0,728 e desvio padrão de 0,977) está apresentado na Equação (21) e na Figura (2.8).

$$\gamma_t = 0.636 (q_t)^{0.072} \left(10 + \frac{m_q}{8} \right) \quad (21)$$

Os valores de γ_t e m_q são expressos na mesma unidade de kN/m^3 e q_t é dado em kPa .

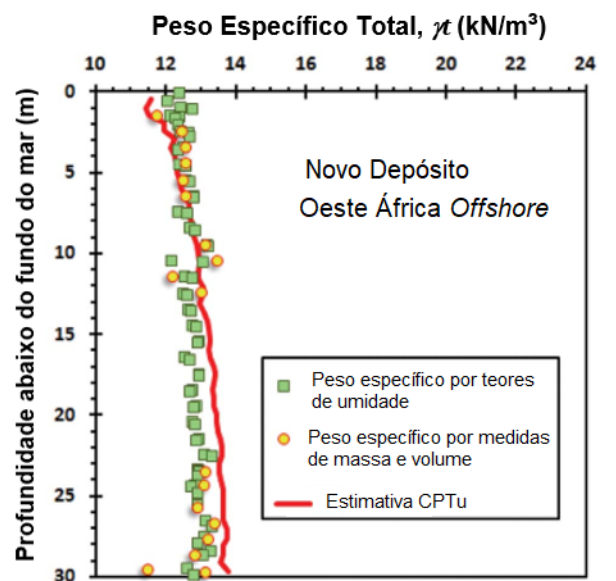
Figura 2.8 Relação entre peso específico e equacionamento proposto



Fonte: Adaptado de Mayne e Peuchen (2012)

Mayne e Peuchen (2012) validaram o equacionamento proposto em dois bancos de dados independentes *offshore*, sendo um depósito localizado no Oeste da África e outro localizado no mar Cáspio. O banco de dados englobava dados de ensaios CPTu e medidas de peso específico obtidos tanto por meio de medidas de massa e volume, quanto obtidos por meio de relações com teores de umidade. Para ambos os locais os autores identificaram boa aplicabilidade do equacionamento proposto, como demonstra a Figura (2.9), por exemplo, para os dados do depósito do Oeste da África. Esta figura, apresenta o comparativo entre os valores do peso específico estimado a partir dos dados do ensaio CPTu com dados do peso específico medido e calculado a partir de teores de umidade.

Figura 2.9 Relação entre o peso específico total e a profundidade abaixo do fundo do mar em depósito no Oeste Africano



Fonte: Adaptado de Mayne e Peuchen (2012)

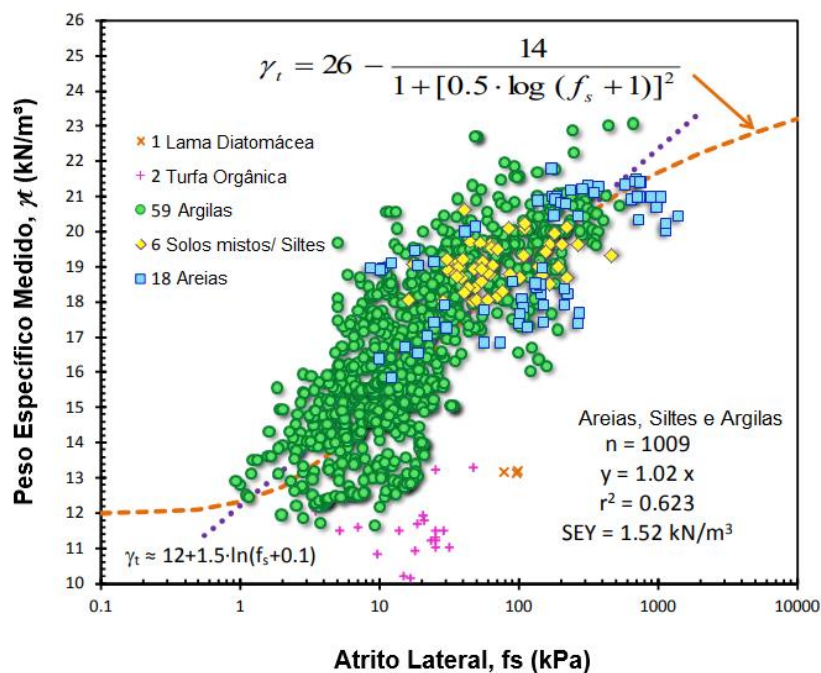
2.3.5 Proposta de Mayne (2014)

Uma metodologia diferenciada é proposta por Mayne (2014) para estimar o peso específico dos solos através de resultados de ensaio CPTu, baseando-se apenas na relação do peso específico com medidas de atrito lateral do cone. O autor deriva sua equação de uma ampla base de dados, com 1009 observações (n), englobando solos granulares, siltes e argilas, conforme mostra a Figura (2.10). O equacionamento proposto pelo autor é apresentado pela Equação (22) e Equação (23). A Figura (2.10) apresenta a regressão realizada, na qual foi obtido um coeficiente de regressão de 0,623 e um desvio padrão de 1,52 kN/m³.

$$\gamma_t = 26 - \frac{14}{1 + [0.5 \cdot \log(f_s + 1)]^2} \quad (22)$$

$$\gamma_t \approx 12 + 1.5 \ln(f_s + 1) \quad (23)$$

Figura 2.10 Relação entre peso específico medido e atrito lateral



Fonte: Adaptado de Mayne (2014)

Dentre as leituras feitas no ensaio do piezocone, o atrito lateral ou atrito de luva (f_s) é a medida que apresenta maiores incertezas, sendo em função disso o menor valor do coeficiente de determinação (MAYNE, 2014). Lunne (2010), explica que essa variabilidade presente no parâmetro f_s se dá pelo fato de alguns cones terem áreas de extremidade diferentes onde a pressão dos poros atua, na parte superior e inferior da lateral. Algumas ideias surgem para minimizar o problema, mas não para solucioná-lo totalmente. Ainda segundo o autor, não é possível utilizar esta medida em todo seu potencial e que também é um desafio que deve continuar presente no debate, tanto de pesquisadores quanto de empresas que desenvolvam os cones.

2.3.6 Proposta de Lengkeek, de Greef e Joosten (2018)

A justificativa para a proposta desenvolvida pelos autores se dá na necessidade da abrangência de estimativas de peso específico para solos orgânicos, como as turfas. A estimativa do peso específico nestes solos realizada por meio da aplicação dos métodos desenvolvidos para solos minerais, pode não resultar num valor confiável, deixando margem para erros de projeto.

A proposta dos autores foi desenvolvida a partir de um banco de dados composto por resultados de CPT definidos no mesmo nível de coleta de amostras para a determinação do peso específico em laboratório. Foram avaliados 300 ensaios CPT localizados em diferentes cidades da Holanda.

A densidade real dos grãos (G) em solos orgânicos é bastante baixa, quando comparada a solos minerais (oriundos da decomposição da rocha), sendo esta afetada pelos constituintes orgânicos presentes no solo (item 2.1.5 deste trabalho). Os autores avaliam as diversas correlações existentes, entre elas Robertson *et al* (1986); Robertson e Cabal (2010); Mayne *et al.* (2010) e Mayne (2014). Esta última, utilizando o parâmetro de atrito lateral (f_s), deixa bastante claro que não abrange as argilas orgânicas e as turfas.

Para desenvolver a correlação, Lengkeek, de Greef e Joosten (2018), levaram em consideração algumas premissas, tais como: o peso específico saturado é uma função contínua da medida dos dados de CPT padrão, não há necessidade de aplicação de nenhum procedimento iterativo e há aplicação em solos moles e orgânicos típicos da Holanda. Com uma aproximação do que prevê o método Robertson e Cabal (2010), contornos de mesmo peso específico podem ser apresentados no plano $q_t - Rf$, seguindo a Equação (24).

$$\gamma_{sat} = \gamma_{sat, ref} - \beta \cdot \frac{\log\left(\frac{q_{t,ref}}{q_t}\right)}{\log\left(\frac{R_{f,ref}}{R_f}\right)} \quad (24)$$

em que, $\gamma_{sat, ref}$ é o peso específico de referência, onde a resistência do cone é constante, independente do Rf ; $q_{t,ref}$ é resistência de ponta corrigida de referência, onde o peso específico é constante, independente da relação de atrito; $R_{f,ref}$ é a razão de atrito de referência na qual o ápice de todas as linhas de mesmo peso específico está localizado e β é a medida de inclinação de contornos de mesmo peso específico.

A equação ainda implica que, para todas as resistências de ponta corrigidas que tiverem valor inferior ao $q_{t,ref}$, o peso específico saturado diminuirá na mesma proporção que a razão de atrito aumentar. Tendo em vista que o peso específico dos solos saturados não terá valores muito inferiores ao

peso específico da água (γ_w), é recomendado que o valor do peso específico estimado seja limitado a 9,81 kN/m³. As turfas, no entanto, podem atingir valores de peso específico de 9,0 kN/m³, uma vez que geralmente contém gases em sua composição.

De acordo com os autores, a formulação básica é dada de tal forma que os valores de referência podem ser escolhidos facilmente e os parâmetros de inclinação podem ser facilmente ajustados. Ela pode ser aplicada para um tipo específico de solo, para uma única camada do local ou para todas as camadas em grandes projetos.

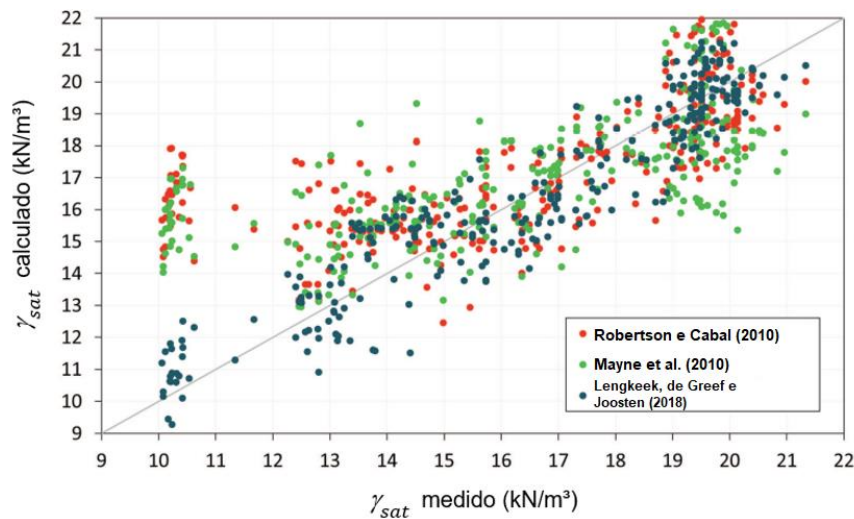
Para validação do método, os autores utilizaram de valores de peso específico saturado obtidos através de ensaios laboratoriais, comparados aos resultados de ensaio CPT médios correspondentes à profundidade de coleta da amostra. Os autores delimitaram como requisito uma distância de no máximo 1 metro entre o furo amostral e o ponto de medida do cone. Uma análise de regressão permitiu que valores fossem adotados, presentes na Tabela (4) e utilizados na equação gerada pelo método, junto aos 300 pontos de dados mencionados anteriormente. Junto a esta análise, os autores também verificaram as demais correlações previamente por eles citadas, excluindo Mayne (2014), por uma questão de clareza, segundo os autores, o que não ficou totalmente claro para o leitor, mas pode estar associado ao fato de Mayne (2014) se utilizar de um grande banco de dados sem muita conexão com turfas e argilas orgânicas. Na Figura (2.11), apresenta-se o gráfico do peso específico calculado *versus* peso específico medido.

Tabela 4 - Valores adotados para método

Parâmetro	Valores adotados com melhor ajuste
$\gamma_{sat, ref}$	19,0
$q_{t, ref}$	5,0
$R_{f, ref}$	30,0
β	4,12

Fonte: Adaptado de Lengkeek, de Greef e Joosten (2018)

Figura 2.11 Peso específico saturado: calculado versus medido



Fonte: Adaptado de Lengkeek, de Greef e Joosten (2018)

Para corroborar com as informações da figura acima, parâmetros estatísticos através do ajuste de tendência pelo método de Pearson (coeficiente de determinação - R^2), declive (1:x) e desvio padrão (S.E.Y) são apresentados para as diferentes correlações testadas e a correlação proposta. Verifica-se através da Tabela (5) que o método proposto pelos autores apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2=0,95$) e o menor desvio padrão (S.E.Y=1,13) para os dados analisados, o que demonstra a confiança no método para este banco de dados em específico.

Tabela 5 - Resultados de múltiplos métodos

Método	R^2	Declive [1:X]	S.E.Y
Equação proposta	0,88	0,95	1,13
Robertson e Cabal (2010)	0,49	0,45	1,46
Mayne et al (2010)	0,45	0,47	1,65
Mayne (2014)	0,39	0,42	1,68

Fonte: Adaptado de Lengkeek, de Greef e Joosten (2018)

É preciso salientar que das correlações da literatura analisadas por Lengkeek, de Greef e Joosten (2018), o método proposto por Robertson e Cabal

(2010), não considera γ_{sat} menor que 15kN/m³ e Mayne *et al.* (2010) foca seu estudo basicamente em argilas moles e siltes, sendo o mínimo considerado de $\gamma_{sat} = 12$ kN/m³. Sendo assim, Lengkeek, de Greef e Joosten (2018) utilizaram também uma base de 193 medições realizadas em solos com γ_{sat} superiores a 15 kN/m³, obtendo um R^2 de 0,77 para a equação que propuseram, em contrapartida de valores de R^2 de 0,28-0,60 obtidos com a aplicação das demais correlações. Este fato permite dizer que mesmo para solos não orgânicos a equação proposta por Lengkeek, de Greef e Joosten (2018) demonstrou uma melhor estimativa, quando comparada à aplicação das demais metodologias no banco de dados analisado.

De acordo com Lengkeek, de Greef e Joosten (2018), valores de desvio padrão do peso específico estimado foram da ordem de 1 kN/m³. Segundo os autores este erro é causado em primeiro lugar pela distância entre o CPT e o furo amostral e pela variação nas direções horizontais e verticais. Também atribuem o erro aos baixos valores de resistência de ponta e atrito lateral encontradas no solo orgânico, especialmente para turfas. A inconsistência nos valores de teste de laboratório também agrega algum erro. Por fim, variações relacionadas ao tipo de solo, tensão efetiva, envelhecimento, presença de material orgânico e saturação também colaboram para o desvio padrão encontrado.

É importante salientar que este é um método específico para turfas e argilas orgânicas.

2.4 ESTATÍSTICA NA ENGENHARIA

A estatística, na atualidade, tem grande contribuição no processo de tomada de decisão, permitindo uma análise dos dados disponíveis e que estão sujeitos a um certo grau de incerteza (RAO, 1997). Consiste num conjunto de métodos e técnicas que envolve desde o planejar, coletar dados, verificar sua consistência, a tabulação ou processamento, organização e a análise e interpretação dos dados que buscam explicar os mais variados fenômenos (IGNÁCIO, 2010).

Na engenharia não seria diferente, tendo em vista que a área demanda de muita pesquisa e em muitos casos utiliza métodos estatísticos quantitativos para definição de parâmetros de projeto. Segundo Barbetta, Reis e Bornia (2010), muitas vezes, a relação entre estatística e engenharia é ainda mais estreita, e os próprios métodos de engenharia costumam incorporar totalmente os procedimentos probabilísticos ou estatísticos. Dessa forma, para que um aluno possa entender certos métodos de engenharia, é necessário que tenha conhecimentos de probabilidade e estatística.

2.4.1 Análise de regressão linear

Uma das técnicas que se destaca na estatística é a análise de regressão, a qual é uma técnica utilizada para investigar a relação existente entre variáveis através da construção de uma equação linear. De maneira geral, essa técnica pode ser utilizada com vários objetivos, dentre os quais se pode destacar: descrever a relação entre variáveis para entender um processo ou fenômeno; prever o valor de uma variável a partir do conhecimento dos valores das outras variáveis; substituir a medição de uma variável pela observação dos valores de outras variáveis; controlar os valores de uma variável em uma faixa de interesse (AMARAL, SILVA e REIS, 2009).

As regressões lineares podem ser simples ou múltiplas, chamamos de regressão linear simples quando temos apenas um regressor ou uma variável independente (MONTGOMERY E RUNGER, 2009). Porém devido a complexidade dos mecanismos científicos, quando é necessária a previsão de uma importante resposta, utiliza-se o modelo de regressão linear múltipla (WALPOLE et al., 2008). De acordo com Barbetta, Reis e Bornia (2010), nesta regressão procura-se construir um modelo estatístico-matemático para retratar a relação entre a variável dependente e as demais variáveis, chamadas independentes, possibilitando prever a variável dependente em função do conhecimento das variáveis independentes.

2.4.1.1 Transformação

Segundo Montgomery e Runger (2009), é possível em uma regressão que se considere o modelo de regressão linear como não apropriado, devido a verdadeira função da regressão ser não-linear. É possível determinar a não-linearidade de uma função através da experiência ou da própria teoria em questão, bem como através de um diagrama de dispersão. Estes modelos, os quais são chamados de intrinsecamente lineares, podem ser dados por exemplo, através de uma função exponencial, a qual pode ser transformada em uma linha reta com o uso de uma transformação logarítmica.

A transformação deve ser feita em x , devido a alteração em y ser capaz de alterar materialmente a forma de distribuição dos erros na distribuição normal, podendo também ocasionar diferenças substanciais no próprio erro (KUTNER *et. al* 2004).

2.4.2 Correlação

Nos métodos de estimativa de peso específico natural, os quais são apresentados na literatura, a correlação entre parâmetros é o que fundamenta a determinação deste índice físico. Pode-se dizer que o conceito de correlação se refere a uma ligação numérica entre duas variáveis, não implicando necessariamente, em uma relação de causa e efeito. Quando duas variáveis estão caminhando para um mesmo sentido, diz-se que as mesmas estão positivamente correlacionadas e quando caminham em sentidos opostos, negativamente correlacionadas (BAECHER E CHRISTIAN, 2003; BARBETTA *et al.*, 2010).

O coeficiente de correlação linear de Pearson (R) é uma análise estatística utilizada para determinação de força ou intensidade ou, ainda, o grau de relação linear entre duas variáveis. O sinal do coeficiente é responsável por expressar o sentido da correlação, e a intensidade é representada por um valor numérico, o qual oscila entre -1 e 1. Quando não existe qualquer sinal de relação linear, R é igual a 0 (STEVENSON, 2001; BARBETTA, REIS e BORNIA, 2010). Além disso, é importante lembrar que em uma correlação, os valores dos coeficientes não

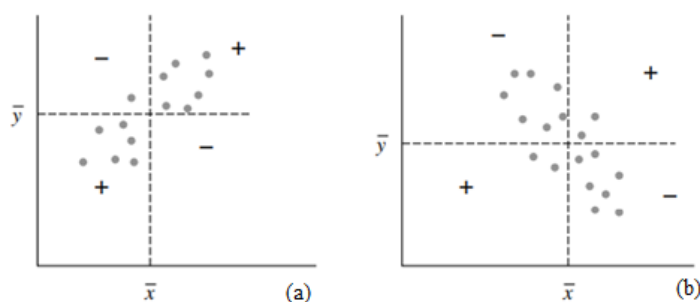
podem depender das unidades de medidas dos dados (metros, peso, altura, etc.).

Para o cálculo, em um primeiro momento é definido o valor da covariância entre as duas variáveis, como proposto na Equação (25) e, posteriormente, obtém-se o coeficiente de correlação de Pearson, Equação (26). Na Figura (2.12a), à esquerda, é possível observar como se apresenta o gráfico caso a correlação seja positiva, já na Figura (2.12b), à direita, demonstra-se um gráfico com correlação negativa.

$$cov(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X'_i - \bar{X}) \cdot (Y'_i - \bar{Y})}{n-1} \quad (25)$$

$$R = \frac{cov(x, y)}{S_X \cdot S_Y} \quad (26)$$

Figura 2.12 Gráficos de correlações positivas (a) e negativas (b)



Fonte: Devore (2006)

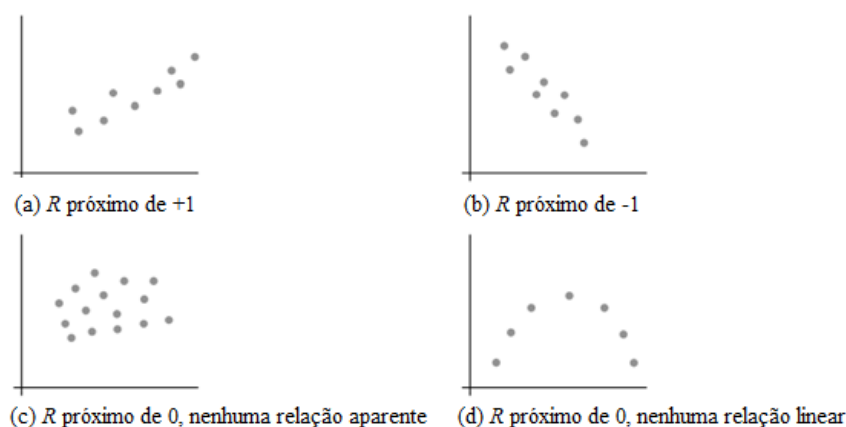
Das propriedades mais importantes de R citadas pelo autor, tem-se:

- a) Na propriedade 1, o valor de R não depende de qual das duas variáveis do estudo é chamada de x e qual é chamada de y ;
- b) A propriedade 2 apresenta que, valor de R não depende das unidades de medida de x e y ;
- c) Tem-se na 3ª propriedade que $-1 \leq R \leq 1$;
- d) Na propriedade 4, $R = 1$ se todos os pares (x_i, y_i) estiverem alinhados em linha reta com coeficiente angular positivo e $R = -1$ se todos os pares (x_i, y_i) estiverem alinhados com um coeficiente angular negativo;

- e) A propriedade 5 diz que quadrado do coeficiente de correlação da amostra fornece o valor do coeficiente de determinação que resultaria de um ajuste do modelo de regressão linear simples, dado por $(R)^2 = R^2$.

Uma grande diferença entre correlação e análise de regressão se dá na propriedade 1, onde na correlação é possível não determinar qual das variáveis é a dependente ou preditiva (y) e quais são as preditoras (x), e na análise de regressão é fundamental que se deixe isso explícito. Todavia a propriedade 5 apresenta que a proporção de variação na variável dependente explicada pelo ajuste do modelo de regressão linear simples não depende de qual variável desempenha esse papel. A propriedade 2 equivale a dizer que R não se modifica independente da escala de medida do item utilizada. Na propriedade 3 tem-se a definição de que o valor máximo de R , corresponde ao maior grau possível de relação positiva, ou seja, $R = 1$, da mesma forma que $R = -1$ é identificado como a relação mais negativa. Na propriedade 4, entende-se que as maiores correlações positivas e negativas somente serão alcançadas se todos os pontos estiverem sobre uma linha reta, tendo em qualquer outra configuração de pontos um valor de R menor que 1 em magnitude absoluta (DEVORE, 2006). Na Figura 2.13 podem ser observados comportamentos de dados para diferentes valores de R .

Figura 2.13 Gráficos de dados para diferentes valores de R



Fonte: Adaptado de Devore (2006)

Devore (2006) afirma que, para que se possa fundamentar a análise das correlações e determinar seus resultados em correlações fortes ou fracas, uma regra prática é utilizada. Afirma-se que a correlação é considerada fraca se $0 \leq |R| \leq 0,5$ e é considerada forte se $0,8 \leq |R| \leq 1$ e moderada para os demais casos. Quando se verifica que $R = 0,5$ é considerado fraco, tem-se que analisar que $R^2 = 0,25$ e isso significa que uma regressão de y sobre x , apenas 25% da variação y observada seria explicada pelo modelo.

Tem-se que o coeficiente de determinação (R^2), ou razão de soma dos quadrados, é usado para julgar a adequação do modelo de regressão proposto. Explica-se também o R^2 como a quantidade de variabilidade nos dados considerada pelo modelo de regressão (MONTGOMERY E RUNGER, 2009). Com um valor alto de R^2 , existe uma melhor explicação para a variação de y através do modelo de regressão linear simples. Quando o R^2 se apresenta pequeno, é muito provável que se faça uma análise extra, com um modelo não-linear ou de regressão múltipla com mais de uma variável, explicando com mais eficiência a variação de y . (BARBETTA, REIS e BORNIA, 2010; DEVORE, 2006).

2.4.3 Análises de observações influentes

2.4.3.1 Multicolinearidade

A colinearidade ou multicolinearidade, quando falamos de mais de duas variáveis, explica a dependência entre as variáveis regressoras (x), segundo ABNT (2014). Quando existe a situação e a dependência é forte, diz-se que as variáveis são colineares ou que existe multicolinearidade. Um exemplo é quando existem algumas variáveis regressoras as quais compõe uma mistura, então tal restrição sempre vai existir devido a soma dos componentes ser sempre constante. (MONTGOMERY E RUNGER, 2009).

Ainda segundo os autores supracitados, uma forma de verificar a existência de multicolinearidade é calculando o fator de inflação da variância (FIV), o qual quanto maior for, mais severa a multicolinearidade. Alguns autores sugerem que use o valor de 10 para limite máximo, quando este for ultrapassado, a multicolinearidade se apresenta como um problema para a regressão. Essas

variâncias podem acabar por provocar degenerações no modelo e limitam a utilização do mesmo. Para que se faça possível a utilização de dados na presença de multicolinearidade, recomenda-se utilizar de medidas corretivas, como ampliação da amostra com dados específicos para fragmentar as dependências lineares que estão presentes correntemente ou regressão de componentes principais. Ainda outra solução proposta é retirar as variáveis que possuem colinearidade do modelo, mas a desvantagem neste caso é o descarte de informação contido na variável que é retirada (ABNT, 2004; MONTGOMERY E RUNGER 2009).

Porém não existe um consenso entre os estatísticos em relação as soluções mais apropriadas quando existe colinearidade na regressão, sendo uma possibilidade continuar a utilizar o modelo que inclui todas as variáveis (DEVORE, 2006).

2.4.3.2 Outliers

Já os *outliers* são considerados pontos influenciadores e atípicos, eles reduzem a sensibilidade dos procedimentos gráficos, onde mesmo um único *outlier* extremo pode alterar significativamente o resultado da regressão. Muitos deles podem ser oriundos de erros no processo experimental ou sem causa provável. Uma abordagem possível é a omissão destes pontos para que a regressão seja recalculada. Caso seja determinado manter os *outliers*, pode-se usar um princípio de estimativa que atribui um peso menor aos dados afastados do que os valores encontrados pelo princípio dos mínimos quadrados (ABNT, 2014; DEVORE, 2006).

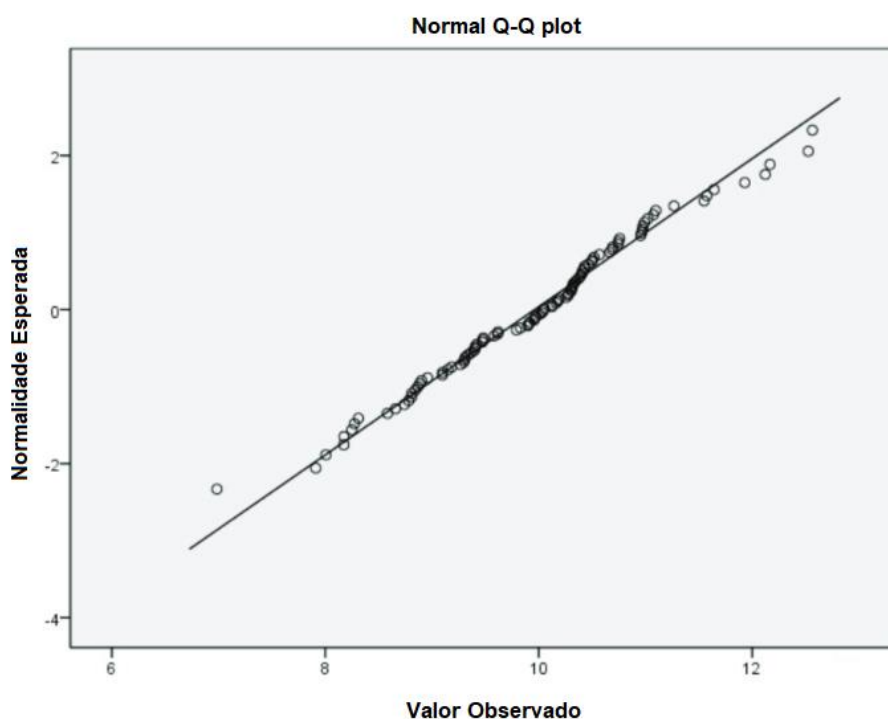
2.4.4 Normalidade dos dados

Diversos são os testes disponíveis na literatura estatística que dependem, ao menos na forma teórica, da suposição de normalidade (WALPOLE *et al.* 2009). Devore (2006), recomenda um gráfico de probabilidade normal dos resíduos padronizado, o qual deve servir como base para validação da hipótese de normalidade.

Um método muito utilizado para a determinação da hipótese de normalidade, se dá através do gráfico quantil-quantil (*qq-plot*) ou quantil-quantil normal padrão (*qq-norm*). Segundo Wilk e Gnanadesikan (1968), os quais propuseram o gráfico de quantis, ele é sugerido devido a sua plotagem gerar uma reta ou quase uma reta, com a localização e inclinação alteradas se necessário. Os autores citam que esta invariância se tornou atraente principalmente pela facilidade com que os humanos tem em detectar uma linearidade e os desvios da mesma serem sensíveis e fácil de serem verificados.

A Figura (2.14) apresenta um modelo de gráfico *qq-plot*, onde no eixo horizontal estão os valores da variável e no eixo vertical os valores esperados no caso da variável ter distribuição normal. Caso haja uma boa aderência dos dados à distribuição normal, os pontos se colocam próximos a reta de referência presente no gráfico (LEOTTI, COSTER e RIBOLDI, 2012).

Figura 2.14 Gráfico Q-Q Plot para apresentar normalidade



Fonte: Adaptado de Leotti, Costner e Riboldi (2012)

2.4.5 Validação

Segundo Kutner *et al.* (2004), tem-se como melhor forma de validar um modelo de regressão a coleta de novos dados, porém isso na maioria das vezes não é possível. Quando o conjunto de dados tem um tamanho grande suficiente, o ideal é que se divida em dois conjuntos, sendo o primeiro chamado de *model-building* ou amostra de treinamento e o segundo chamado de validação ou conjunto de previsão. O primeiro conjunto é utilizado para o desenvolvimento do modelo de regressão e o segundo é utilizado para que se identifique a capacidade preditiva do mesmo. O nome dado para este procedimento é validação cruzada. A divisão dos dados pode se dar aleatoriamente ou em pares, onde cada par deve ser dividido e colocado um em cada conjunto.

O conjunto de validação ou conjunto de previsão, é validado com mesmo procedimento utilizado para o banco de novos dados. Porém uma desvantagem que pode se fazer presente na divisão de dados, é o fato da variância dos coeficientes da regressão serem maiores do que se fizesse o ajuste para todo o conjunto de dados. Essa questão é mais delicada quando o conjunto é pequeno, pois quando se trata de um conjunto grande essas variações não são tão expressivas (KUTNER *et al.* 2004).

2.5 RESUMO DO CAPÍTULO

A revisão bibliográfica apresentou a propriedade peso específico do solo e as maneiras como ela pode se apresentar e também como se determinar, seja em laboratório ou através de relações entre índices físicos e correlações de ensaios como apresentado na literatura. Através de resultados de ensaios CPT e CPTu é possível estimar o peso específico de um solo por propostas apresentadas por diversos autores. A Tabela (6), resume os autores, equações por eles propostas e dados estatísticos apresentados por cada um.

Métodos estatísticos que relacionam coeficientes de correlação entre uma ou mais variáveis são utilizados pelos autores, como também métodos empíricos para determinação do parâmetro. Os métodos correntes de determinação de peso específico utilizam a resistência de ponta do CPT (qt), o atrito da luva (fs)

e ainda o valor da onda cisalhante (V_s) e foram desenvolvidos para uma extensa gama de solos naturais onde a densidade dos grãos (G) varia geralmente de 2,5 a 2,7.

Além destas propostas de diversos autores, a bibliografia nos traz diversas formas de apresentar um produto estatístico por meio de uma equação e como validá-la, de acordo com seu banco de dados, bem como a determinação das variáveis mais imponentes e análises influentes sobre o modelo.

Tabela 6 - Resumo das propostas apresentadas na literatura para solos naturais

Proposta	Ensaio	Equação	Dados estatísticos
Mayne, 2001	SCPTu	$\gamma_{sat} = 8.32 \log (Vs) - 1.61 \log (z)$	n = 727 R ² = 0,808 S.E = 1,05 kN/m ³
Mayne, 2007	SCPTu	$\gamma_{sat} = 4.17 \ln (Vs1) - 4.03$	n = 731 R ² = 0,775 S.E = 1,0 kN/m ³
		$\frac{\gamma}{\gamma_w} = 0.27 [\log R_f] + 0.36 \left[\log \left(\frac{qt}{pa} \right) \right] + 1.236$	
Robertson e Cabal, 2010	CPT e DMT	$\frac{\gamma}{\gamma_w} = \left[0.27 [\log R_f] + 0.36 \left[\log \left(\frac{qt}{pa} \right) \right] + 1.236 \right] G/2,65$	n = * R ² = * S.E = *
Mayne e Peuchen, 2012	CPTu	$\gamma_t = \gamma_w + \frac{m_q}{8}$	n = 34 R ² = 0,623 S.E= 1,21 kN/m ³
		$\gamma_t = 0.636 (qt)^{0.072} \left(10 + \frac{m_q}{8} \right)$	n = 555 R ² = 0,728 S.E= 0,977 kN/m ³
Mayne, 2014	CPTu	$\gamma_t \approx 12 + 1.5 \ln (f_s + 1)$	n = 1009 R ² = 0,623 S.E = 1,52 kN/m ³
Lengkeek, De Greef e Joosten, 2018	CPT	$\gamma_{sat} = \gamma_{sat,ref} \cdot \beta \cdot \frac{\log \left(\frac{qt,ref}{qt} \right)}{\log \left(\frac{Rf,ref}{Rf} \right)}$	n = 300 R ² = 0,95 S.E = 1,13 kN/m ³

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Powell (2022), abordou durante o 5º simpósio internacional de CPT, a necessidade de se prestar mais atenção ao uso das correlações existentes para determinação do peso específico de um solo. Expondo que muitas pessoas utilizam as correlações prontas em softwares sem que se questione a validade destas informações, o autor deu o nome a esta abordagem de “*blackbox*” ou “caixa preta”, a qual é responsável por superdimensionar ou subdimensionar um projeto e, quando demanda de outras correlações em sequência, agrava ainda mais o erro.

Através destas considerações do autor, também este trabalho busca avaliar e validar modelos de equações seguindo os preceitos estatísticos para maior confiabilidade e segurança no uso dos resultados por este gerados.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento deste trabalho. Todas as análises tiveram por objetivo inicial reunir dados de ensaios CPTu e medidas de peso específico, em diferentes tipos de solo, com G variando entre 1,3 e 4,5. A partir dos dados coletados, correlações existentes na literatura para estimativa do peso específico dos solos foram avaliadas e estudos foram realizados para identificação de novas possíveis correlações entre os dados de ensaios CPTu e o peso específico dos solos.

Nos itens a seguir são apresentadas informações relacionadas ao banco de dados elaborado para esta pesquisa, propostas presentes na literatura para determinação do peso específico do solo, uso de software estatístico e o procedimento necessário para desenvolvimento de modelos de equação. Também é apresentado o processo utilizado para validação das propostas existentes na literatura e das equações modeladas neste estudo.

3.1 BANCO DE DADOS

O banco de dados geral do presente trabalho foi desenvolvido através da consulta de empresa executoras de sondagem e ensaios, banco de dados fornecidos na literatura, assim como dissertações e teses publicadas na literatura. Foram reunidas 1862 observações, das mais diversas localidades e diferentes tipos de solo, dentre eles solos naturais e rejeitos de mineração. Após o banco de dados geral finalizado, o mesmo foi dividido aleatoriamente em banco de dados de desenvolvimento e banco de dados de validação, o que possibilitará uma verificação adequada das propostas existentes e novas, no contexto estatístico. Detalhes sobre a elaboração do banco de dados serão apresentados no item subsequente.

3.1.1 Concepção e montagem do banco de dados

Esta fase do trabalho constituiu-se na estruturação do banco de dados geral, o qual foi a base para as demais análises presentes nesse estudo.

Para que se pudesse elaborar este banco de dados, o *software* Excel foi utilizado, compondo através de suas linhas e colunas, um conjunto de dados de fácil compreensão e que possibilita a inserção de equações matemáticas, quando necessárias.

Tomando como referência as informações que foram levantadas na etapa de coleta dos dados, verificaram-se quais informações eram disponíveis. As variáveis consideradas para o uso, foram as que representavam os principais parâmetros do solo. Dentre esses, alguns davam origens a outros parâmetros, os quais se tornaram variáveis interessantes, devido à presença nas propostas provenientes da literatura e a necessidade de testá-las. Apresenta-se um roteiro dos procedimentos utilizados para que se desenvolvesse o banco de dados de parâmetros para análise deste trabalho:

- a) Coleta dos dados de ensaios CPTu e SCPTu, os quais foram planilhados em Excel;
- b) Escolha de dissertações e teses em que o existiam informações de ensaios CPTu disponíveis;
- c) Releitura do banco de dados fornecido por Paul Mayne;
- d) Definição das profundidades nas quais estavam disponíveis dados completos, com valores de peso específico do solo;
- e) Obtenção do parâmetro (G), o qual se deu de cinco diferentes formas, sendo elas:

- Presente nos dados de ensaios obtidos: 30,90%
 - Calculada através do índice de umidade (w): 0,54%
 - Retirada de gráficos e tabelas de dissertações: 13,68%
 - Obtido na literatura pela busca do tipo de solo: 54,91%
- f) Cálculo dos parâmetros médios de q_t , f_s e u , correspondentes à profundidade na qual estavam disponíveis os dados de peso específico e G . Para o cálculo dos valores utilizou-se uma média, (calculada com 30cm acima e 30 cm abaixo do ponto, totalizando a dimensão de um tubo shelby), ficando mais compatível para relacionar com a profundidade dos ensaios de laboratório;
- g) Inserção dos primeiros dados na planilha, iniciando pelo local de retirada dos dados, seguido do tipo de solo, código dado pela autora ao local de estudo, profundidade (z), nível de água (na), umidade (w), parâmetro de resistência de ponta do cone (q_t), resistência de ponta média (q_t médio), atrito lateral (f_s), atrito de lateral médio (f_s médio), poropressão (u), poropressão média (u médio), peso específico natural (γ_t), densidade real dos grãos (G), parâmetro de poropressão (B_q) , razão de atrito (R_f), índice de vazios (e), velocidade de cisalhamento (V_s e V_{s1});
- h) Divisão do banco de dados geral, possibilitando a verificação cruzada, em banco de dados de desenvolvimento (utilizado para modelagem estatística das propostas de equação) e banco de dados de validação (utilizado para as verificações necessárias). A divisão será de forma aleatória, onde 15% dos dados será reservado para as validações.

A precisão dos dados é fundamental para confiabilidade e segurança do resultado final do trabalho.

3.2 VERIFICAÇÃO DE PROPOSTAS DE ESTIMATIVA DE PESO ESPECÍFICO EXISTENTES NA LITERATURA

Nesta etapa do estudo, utilizou-se as equações apresentadas no referencial teórico, para estimativa do peso específico do solo, comparando o resultado obtido pela aplicação de tais propostas, com os valores presentes neste estudo. A única proposta que não é utilizada para validação é a proposta de Lengkeek, De Greef e Joosten (2018), pelo fato da mesma ser desenvolvida especificamente para turfas e argilas orgânicas e não é adequada para o teste em um banco de dados misto como no caso deste trabalho.

Juntamente ao banco de dados formado com os parâmetros para análise de dados, as equações, originadas nas propostas, foram lançadas na planilha do software Excel. Cada uma das propostas foi inserida em uma coluna, ordenada pelo autor e ano de desenvolvimento, partindo do mais antigo para o mais recente.

Apresenta-se a seguir um roteiro dos procedimentos utilizados para que se desenvolvesse a verificação de propostas existentes na literatura para este estudo:

- a) Compilação das propostas existentes na literatura, conforme discutido no item 2.3 da revisão bibliográfica;
- b) Utilização do *software* Excel, como ferramenta integrante, auxiliando na inserção das equações de propostas junto aos dados de parâmetros já planilhados;
- c) Apresentação das equações com nome dos autores e ordenadas por ano de desenvolvimento, partindo do mais antigo até o mais recente;
- d) Análise das correlações presentes entre os valores estimados nas propostas e valores medidos presentes no banco de dados, com auxílio do *software R Studio*;

3.3 SOFTWARE R STUDIO

O *software R Studio* permite um controle estatístico de qualidade, onde gera resultados através de programação, mas com uma interface mais intuitiva de ser utilizada, o que facilita o processo.

A utilização do coeficiente de correlação para avaliar se duas ou mais variáveis se relacionam é uma das funções exercidas para que se possa determinar se os métodos de estimativa do peso específico para solos naturais apresentam valores coerentes com os resultados medidos em ensaios. Isso pode ser analisado através dos valores de coeficiente de correlação de Pearson (R), através de programação no *software R Studio*.

Em um segundo momento, os parâmetros de resistência de ponta do cone (q_t), atrito lateral (f_s), densidade real dos grãos (G) e poropressão (u_2), são relacionados com o peso específico natural do solo (γ), no intuito de verificar qual deles influência mais na determinação do peso específico do solo e seriam fundamentais para uma nova equação a ser proposta e validada. Além destes citados, parâmetros subsequentes aos citados, foram testados para verificação do desempenho de modelo de equação.

Desta forma, inicia-se a modelagem de uma regressão linear, passando por processos de transformação, caso necessário. A modelagem deve prever alguns cenários, trazendo uma ou mais equações possíveis para que se determine o peso específico do solo.

3.4 PROPOSTA DE MODELO DE EQUAÇÃO

Através dos resultados presentes nos testes de correlação, através do *R Studio*, com as diversas variáveis, as propostas de modelo podem ser elaboradas. Em um primeiro momento utiliza-se apenas as variáveis dos principais parâmetros, e em um segundo momento parâmetros adimensionais.

Para ambos os procedimentos se mantém o mesmo, analisar os itens que possivelmente poderiam alterar o desempenho da equação, como o procedimento de tratamento dos *outliers* e a análise da multicolinearidade.

O tratamento de outliers é realizado com uma programação no *software* estatístico, a qual tem por objetivo ajustar os outliers para que eles estejam iguais ao 0.05 e ao 0.95 percentil da distribuição normal. Para tanto, foi utilizada a abordagem de ajuste baseado na distância interquartil (IQR), onde, um ponto é considerado um outlier quando a distância dele para os quartis é superior a 1.5 vezes a distância interquartil.

Quando abordada a questão da multicolinearidade, a qual é debatida com as mais diversas opiniões pelos estatísticos, usa-se de análise de histograma, presente na programação do *software* estatístico para confirmar a existência ou não desta relação entre variáveis.

Quando projetadas as equações para reconhecimento de seus dados estatísticos, a regressão linear é testada em formato múltiplo. Em um segundo momento, utiliza-se de transformações e gera-se a possibilidade de uma proposta de regressão não-linear, com o uso de logaritmo podendo ser repetida para os diversas cenários, ajustando e modelados de acordo com as melhores regressões presentes.

3.5 VALIDAÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS

Conforme citado no capítulo 1, a verificação ideal é obtida quando é possível testar um banco de dados novo, porém devido à falta de recursos e tempo, foi escolhida para uso a chamada validação cruzada, na qual o banco de dados geral é dividido em dois, sendo o primeiro banco de amostras de treinamento para que seja possível o desenvolvimento do modelo ou modelos, chamado neste trabalho de “banco de desenvolvimento” e o segundo banco de amostra de verificação ou validação, chamado aqui de “banco de validação”.

Das 1862 observações presentes no banco de dados geral, foram divididas em 1583 observações para o banco de desenvolvimento e 279 observações, 15% do banco de dados geral, para o banco de validação, destinado as verificações estatísticas necessárias. A escolha dos 15% foi feita de forma manual e aleatória, mas com participação de todos os tipos de solo presentes no banco de dados geral e por consequência no banco de desenvolvimento.

Através desta validação das equações, com auxílio do *software* estatístico, se torna possível comparar resultados de correlações entre o banco de validação e as propostas dos autores, presentes na literatura e também, permite a validação das equações modelo elaboradas por este estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados deste estudo, referentes à concepção e montagem do banco de dados. Resultados das verificações de propostas presentes na literatura, modelagem de novas equações para determinação do peso específico do solo e a validação das mesmas, também são parte deste capítulo. Vale ressaltar que a interpretação das análises estatísticas foi feita através do *software R Studio*, o qual serviu como ferramenta fundamental no desenvolvimento desta pesquisa.

4.1 BANCO DE DADOS

O banco de dados elaborado serve como base para atingir os objetivos deste trabalho. É através dos dados que se consegue determinar se os métodos atualmente utilizados para solos naturais são compatíveis ou não com uma gama maior de solos onde a densidade real dos grãos (G) varia em maior escala.

O banco de dados geral conta com exatas 1862 observações, sendo elas dos mais diversos tipos de solo. Para o processo de modelagem e validação das equações a serem propostas, o banco de dados geral foi dividido em 2 partes, de forma aleatória, sendo o primeiro chamado de banco de desenvolvimento, do qual se utilizou para que fossem desenvolvidos os modelos de equação, e o segundo, banco de validação, reservado para que as verificações e validações pudessem ser feitas como pede a estatística.

Ambos os bancos de dados, tem em sua composição os seguintes tipos de solos: argilas, areias, rejeitos de mineração, siltes e turfas. No banco de desenvolvimento, o qual tem 1583 dados, as porcentagens dos tipos de solos foram as seguintes: Argilas, 66,77%; Areias, 15,28%, Rejeitos de mineração, 12%; Silte, 4,3% e Turfas, 1,64%. Já no banco de validação, o qual conta com 279 dados, tem-se: Argilas, 69,89%; Areias, 15,05%; Rejeitos de mineração, 10,39%; Silte, 2,5% e Turfas 2,15%. No banco de dados de desenvolvimento os valores de G oscilam em 1,35 a 4,34 e peso específico do solo (γ_t) oscila de 9,69 a 29,89 kN/m³. O banco de validação, apresenta valores variando em G de 1,57 a 3,91 e peso específico do solo oscilando em 10,2 a 25,81 kN/m³.

As Tabelas (7) e (8) apresentam o resumo do banco de dados de desenvolvimento e o resumo do banco de dados de validação, respectivamente.

Tabela 7- Resumo do banco de dados de desenvolvimento

Tipo de solo	Nº de dados	γ_t (kN/m³) mín – max	q_t (kPa) mín – max	f_s (kPa) mín – max	u (kPa) mín – max	G mín – max
Argila	1057	9,64 – 22,84 [16,10]	47,03 – 12.966,11 [789,74]	-0,35 – 706 [12,81]	- 671,8 – 6.078 [350,2]	1,35 – 2,91 [2,56]
Areia	242	14,16 – 21,54 [19,26]	184,95 – 118.000 [7.305,82]	0,33 – 1.401,86 [35,55]	- 1000 – 1.228,81 [116,03]	2,34 – 3,01 [2,7]
Rejeitos	190	11,27 – 29,89 [17,52]	30,37 – 11.448 [463,03]	0,14 – 206 [6,61]	13,09 – 1.789 [167,28]	2,41 – 4,34 [3,05]
Silte	68	9,84 – 20,31 [15,87]	120,89 – 4.309 [492,22]	0,8 – 221 [7,55]	- 98 – 800 [140,07]	2,42 – 3,02 [2,65]
Turfa	26	10,14 – 14,67 [11,49]	121,95 – 740 [304,88]	3,10 – 47,37 [13,03]	0 – 275,9 [34,65]	1,57 – 1,57 [1,57]

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Tabela 8 - Resumo do banco de dados de validação

Tipo de solo	Nº de dados	γ_t (kN/m³) mín – max	q_t (kPa) mín – max	f_s (kPa) mín – max	u (kPa) mín – max	G mín – max
Argila	195	10,2 – 21,78 [16,2]	82 – 11.812,5 [785,85]	1,49 – 349,39 [11,52]	- 88,51 – 6.070 [353,68]	1,69 – 3,07 [2,57]
Areia	42	13,28 – 21,82 [19,63]	188,09 – 102.000 [8.012,78]	1,6 – 713,94 [29,73]	- 750 – 986 [165,54]	2,59 – 2,76 [2,7]
Rejeitos	29	12,19 – 25,82 [17,32]	33,78 – 4.549 [549,99]	0,8 – 64 [5]	-17 – 464,52 [121,54]	2,38 – 3,91 [3,04]
Silte	7	11,68 – 19,2 [16,36]	138,15 – 1.725,45 [641,86]	2,69 – 48 [14,8]	20,68 – 600 [65,6]	2,42 – 3,02 [2,65]
Turfa	6	10,5 – 13,38 [11,39]	163,62 – 700 [483,54]	7,89 – 25,7 [16,52]	0 – 236,4 [76,42]	1,57 – 1,57 [1,57]

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.2 VERIFICAÇÃO DAS PROPOSTAS EXISTENTES

Através da análise dos métodos disponíveis na literatura para solos naturais, alguns foram escolhidos para verificação junto aos solos utilizados na base de dados deste trabalho. Dentre eles podemos citar Mayne (2001), Mayne (2007), Robertson e Cabal (2010) com duas propostas (a e b), Mayne e Peuchen (2012) também com duas propostas (a e b) e Mayne (2014).

Dentre os parâmetros presentes nas propostas existentes na literatura, q_t , f_s , u_2 , V_s , G , m_q , R_f , foram alguns dos quais se fizeram presentes em mais de uma equação modelada pelos autores.

Através do *software R Studio* foi possível estimar o sentido e a intensidade de correlação entre cada proposta e o banco de validação deste estudo, o que proporcionou a verificação necessária. Os resultados obtidos da estimativa do coeficiente de correlação de Pearson, permitiram determinar o método mais compatível com o banco de dados de amostra, o qual conta com diversos tipos de solo e uma grande faixa de valores de G . Os resultados obtidos são apresentados na Tabela (9).

Tabela 9 - Resultados obtidos na verificação das equações e banco de validação

Autores	Coeficiente de correlação de Pearson (R)
Mayne (2001)	$R = -0,014$
Mayne (2007)	$R = -0,29$
Robertson e Cabal (2010 a)	$R = 0,58$
Robertson e Cabal (2010 b)	$R = 0,73$
Mayne e Peuchen (2012 a)	$R = 0,29$
Mayne e Peuchen, (2012 b)	$R = 0,32$
Mayne (2014)	$R = 0,0074$

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A correlação mais fraca e de sentido oposto ao banco de validação, foi dada pela proposta de Mayne (2007), o qual utiliza da velocidade cisalhante (V_s) como parâmetro principal para estimar o peso específico natural do solo. Esta

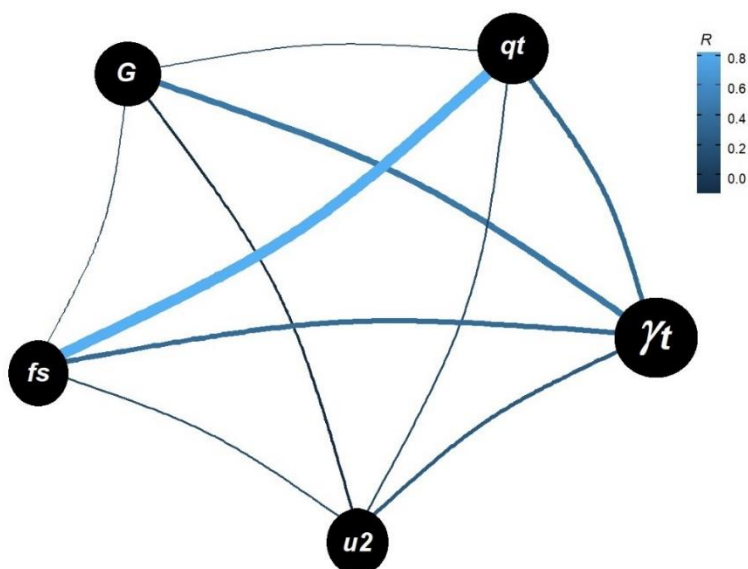
proposta apresentou um valor de coeficiente de correlação de Pearson (R), igual a - 0,29. De outro lado, foi a proposta de Robertson e Cabal (2010b), que de forma adimensional, utiliza de parâmetros como: q_t , G , R_f e uma regressão não-linear, com a presença de logaritmo. Esta proposta apresentou um valor de coeficiente de correlação de Pearson (R), igual a 0,73.

4.3 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DO BANCO DE DADOS

Através do uso do coeficiente de correlação linear de Pearson (R) na plataforma *R Studio*, uma análise preliminar entre os parâmetros principais do banco de dados foi realizada. Entre eles estão resistência de ponta corrigida do cone (q_t), atrito lateral (f_s), poropressão (u_2), densidade real dos grãos (G) e peso específico natural do solo (γ_t).

A Figura (4.1), gerada através do software, apresenta a existência de uma correlação direta entre os parâmetros peso específico natural do solo (γ_t) e densidade real dos grãos (G), também com os parâmetros atrito lateral (f_s) e resistência de ponta corrigida do cone (q_t). A correlação entre o parâmetro de poropressão (u_2), também se apresenta em relação ao peso específico, porém em menor intensidade.

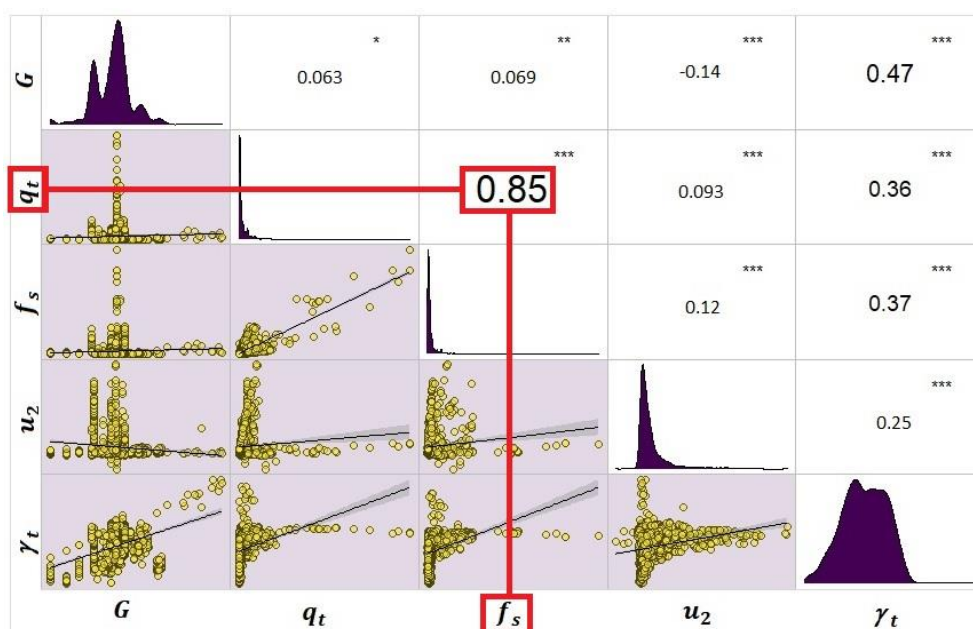
Figura 4.1 Correlação entre parâmetros do banco de dados



Fonte: Adaptado do software *R Studio* (2022)

A forte correlação apresentada pelos parâmetros q_t e f_s , permite que se analise a possibilidade da presença de uma multicolinearidade entre as variáveis, a qual se confirma através do histograma presente na Figura (4.2), onde analisamos os valores de correlação presentes. A partir de 0.8, a relação é considerada colinear entre 2 variáveis, neste caso tem-se o valor de 0.85 para a relação dos parâmetros resistência de ponta e atrito lateral.

Figura 4.2 Correlações entre parâmetros do banco de dados e valores correspondentes



Fonte: Adaptado do software R Studio (2022)

A multicolinearidade é assunto de diversas dúvidas ainda presentes no meio estatístico e levando em conta que as variáveis que se enquadram nessa questão são ambas fundamentais para definição do peso específico, foi de acordo mantê-las nos modelos de equação.

Além desta análise, os *outliers* também passaram por tratamento através do *software* estatístico. Através de uma programação escolhida, fez com que os dados localizados fora dos percentis estipulados, fossem ajustados à curva de distribuição dos dados desta pesquisa.

4.4 ANÁLISE DOS MODELOS DE EQUAÇÃO

4.4.1 Modelagem das equações

Tendo feito as análises iniciais do banco de dados geral e utilizando das regressões lineares através do *software R Studio*, uma série de equações modelo puderam ser propostas neste estudo devido a utilização de diferentes cenários, dos quais se pode retirar os valores de coeficiente de determinação (R^2) e desvio padrão. De início, a tentativa de uma regressão linear se fez falha, por oferecer um R^2 baixo e um erro alto, optou-se então por utilizar de regressão não-linear, com logaritmo em algumas das variáveis.

4.4.1.1 Equações modelo

A primeira equação proposta, chamada Equação Modelo (4.1), utilizou os parâmetros q_t , f_s , u_2 e G , com logaritmo inserido nas três primeiras variáveis e o uso do intercepto, o qual apresentou em resumo através do *software* estatístico *R Studio*, não ter valor significativo nesta proposição. Devido ao uso da função logarítmica para a transformação, consideramos o modelo como não-linear.

$$\gamma_t = -0,5 + 0,94 \log q_t + 0,43 \log f_s + 0,11 \log u_2 + 3,4 * G \quad (4.1)$$

Esta equação conta com 1583 observações utilizadas para seu desenvolvimento, um R^2 (coeficiente de determinação) de 0,6214 e um desvio padrão (erro) de 1,7 kN/m³. Desta proposta inicial, se fez um novo teste, excluindo a poropressão, a qual apresentou uma correlação direta mais fraca que as demais com o peso específico, proporcionando o segundo modelo de equação não-linear, Equação Modelo (4.2).

$$\gamma_t = -0,04 + \log q_t + 0,37 \log f_s + 3,45 * G \quad (4.2)$$

Esta equação obteve um R^2 de 0,6175 e um desvio padrão de 1,7 kN/m³. Caso considerarmos apenas o coeficiente de determinação para análise

estatística, onde entre as equações existe uma diferença de apenas 0,004, pode-se afirmar que a variável poropressão não é fundamental neste modelo de regressão. Porém, sabe-se que este coeficiente é apenas uma das análises a ser levada em consideração na estatística, o que nos deixa o alerta para um maior cuidado na hora de tomar a decisão em manter ou excluir uma variável em qualquer equação. Além disso, as duas equações não demonstraram valor estatístico para o intercepto, o local onde é zerada a função. Desta forma ele seria passível de retirada e ao longo deste capítulo será apresentado o modelo considerando a ausência do mesmo.

Levando em consideração que alguns países não utilizam o sistema internacional de unidades, isso faz com que seja necessário moldar uma equação para um formato adimensional. Tendo em vista este quesito, os parâmetros q_t , u_2 , f_s e G , foram alterados em alguns dos modelos determinados, utilizando em seu lugar $\frac{q_t}{pa}$, $\frac{\Delta u}{pa}$, R_f e $\frac{G}{2,7}$, respectivamente. A primeira variável é a resistência de ponta dividida pela pressão atmosférica; a segunda é a razão entre o delta da poropressão ($u_2 - u_0$) e pressão atmosférica; o parâmetro R_f é a razão entre atrito lateral e resistência de ponta; e por fim, a densidade real dos grãos dividida pela média apresentada na literatura utilizada para solos naturais. Nesta proposta o logaritmo é utilizado na resistência de ponta sobre a pressão atmosférica e no parâmetro poropressão. Desta forma é obtida a Equação Modelo (4.3).

$$\gamma_t = 4,57 + 1,45 \log \frac{q_t}{pa} - 0,02 \log \frac{(u_2 - u_0)}{pa} + 0,11 R_f + 8,65 * \frac{G}{2,7} \quad (4.3)$$

Esta proposta conta com 1583 observações utilizadas para seu desenvolvimento, um R^2 (coeficiente de determinação) de 0,6126 e um desvio padrão (erro) de 1,72 kN/m³. Como nos modelos sem valores adimensionais, os mesmos dados foram testados da mesma forma, porém desta vez sem o uso da poropressão (u_2), proporcionando o quarto modelo de equação não-linear, Equação Modelo (4.4).

$$\gamma_t = 4,57 + 1,45 \log qt/pa + 0,11 R_f + 8,65 * G/2,7 \quad (4.4)$$

A equação obteve um R^2 de 0,6128 e um desvio padrão de 1,72 kN/m³. Da mesma forma como abordado anteriormente, analisando através dos valores de coeficiente de determinação, não existe uma diferença significativa entre as Equações Modelo 4.3 e 4.4.

4.4.2 Intercepto

Das equações propostas na literatura para estimar o peso específico do solo utilizadas neste trabalho, apenas algumas delas usavam os valores de intercepto em sua modelagem. Desta forma, após o desenvolvimento das primeiras quatro equações modelos e, o *software* estatístico utilizado apresentando em cada resumo de dados a pouca influência do intercepto na regressão em questão, um aprofundamento se fez e apesar das dúvidas existentes na literatura estatística, se usou da base teórica da geotecnia para fundamentar a possível retirada desta constante.

Tem-se que o intercepto é a constante na análise de regressão linear, ou seja, o valor no qual a linha ajustada cruza o eixo y nas análises através do *software R Studio*. A discussão sobre o uso ou não do intercepto ainda é grande, segundo Eisenhauer (2003), já Kozak e Kozak (1995), trazem que, os modelos equacionais sem uso do intercepto devem ser utilizados somente quando é possível justificar teoricamente.

No caso da geotecnia, explicamos a isenção do intercepto relembando que um solo pode conter praticamente qualquer elemento contido na crosta terrestre. Contudo, de longe os mais abundantes são o oxigênio, silício, hidrogênio e alumínio. Estes elementos, juntamente com o cálcio, o sódio, potássio, magnésio, e carbono, compreendem mais de 99 por cento da massa sólida dos solos em todo o mundo. Átomos destes elementos estão organizados em vários cristais produzindo os minerais comuns encontrados no solo. Minerais possuem uma série de propriedades tais como cor, brilho, clivagem, dureza, densidade entre outras. A densidade do mineral é representada pela relação de massa e volume. Como não há solo sem minerais todo solo possui uma determinada massa específica e decorrente desta massa específica um peso específico (MITCHELL E SOGA, 2005).

Portanto, beneficiando-se destas considerações, é possível retirar o intercepto das equações modelo, o qual já não mostrava valor estatístico no *R Studio* e também se sustenta por meio de base teórica.

4.4.2.1 Equações modelo sem intercepto

A proposição da Equação Modelo (4.5), utiliza dos mesmos parâmetros da Equação Modelo (4.1), a qual não usa de valores adimensionais, mas faz uso da base logarítmica. A Equação Modelo (4.6), seguindo o padrão de estudo desta pesquisa, retira o parâmetro poropressão para analisar os resultados. Os modelos (4.5) e (4.6) foram desenvolvidos no banco de desenvolvimento deste estudo.

$$\gamma_t = 0,92 \log qt + 0,44 \log fs + 0,09 \log u_2 + 3,32 * G \quad (4.5)$$

$$\gamma_t = 0,99 \log qt + 0,37 \log fs + 3,37 * G \quad (4.6)$$

Esta equação obteve para o R^2 , um valor igual a 0,99, consideravelmente superior aos valores de coeficiente de determinação apresentados nos cenários onde o intercepto se fazia presente, e com um desvio padrão de 1,7 kN/m³. Na Equação Modelo (4.6), retirou-se além do intercepto, a poropressão, apontando o mesmo valor de desvio padrão da equação anterior e um valor de 0,98 para o coeficiente de determinação.

Seguindo um padrão de análise, as equações com parâmetros adimensionais também foram modeladas sem o uso da constante intercepto. A Equação Modelo (4.7), aplicou as mesmas variáveis da Equação Modelo (4.3), e o logaritmo foi igualmente utilizado para a resistência de ponta sobre a pressão atmosférica e no parâmetro poropressão. Fez-se por último, o cenário da equação adimensional sem intercepto e sem a poropressão, chamada Equação Modelo (4.8).

$$\gamma_t = 1,47 \log qt/pa + 0,29 \log \frac{(u_2 - u_0)}{pa} + 0,19 Rf + 12,87 * \frac{G}{2,7} \quad (4.7)$$

$$\gamma_t = 1,54 \log \frac{qt}{pa} + 0,23 Rf + 12,9 * G/2,7 \quad (4.8)$$

Ambas equações obtiveram um R^2 de 0,98 e desvio padrão de 1,8 e 1,78 kN/m³ respectivamente. Na Tabela (10), verifica-se o resumo das equações modelo propostas no estudo e o desvio padrão por elas apresentado.

Tabela 10 - Resumo das equações modelo propostas neste estudo

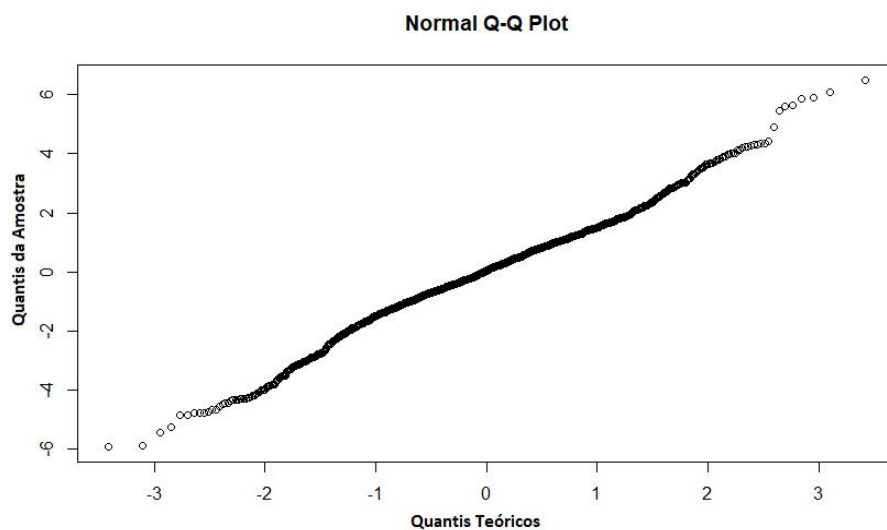
Proposta	Equação	R^2	Desvio padrão
Eq. Modelo 4.1	$\gamma_t = -0,5 + 0,94 \log qt + 0,43 \log fs + 0,11 \log u_2 + 3,4 * G$	0,6214	1,70 kN/m ³
Eq. Modelo 4.2	$\gamma_t = -0,04 + \log qt + 0,37 \log fs + 3,45 * G$	0,6175	1,70 kN/m ³
Eq. Modelo 4.3	$\gamma_t = 4,57 + 1,45 \log \frac{qt}{pa} - 0,02 \log \frac{(u_2 - u_0)}{pa} + 0,11 Rf + 8,65 * \frac{G}{2,7}$	0,6126	1,72 kN/m ³
Eq. Modelo 4.4	$\gamma_t = 4,57 + 1,45 \log qt/pa + 0,11 Rf + 8,65 * G/2,7$	0,6128	1,72 kN/m ³
Eq. Modelo 4.5	$\gamma_t = 0,92 \log qt + 0,44 \log fs + 0,09 \log u_2 + 3,32 * G$	0,99	1,70 kN/m ³
Eq. Modelo 4.6	$\gamma_t = 0,99 \log qt + 0,37 \log fs + 3,37 * G$	0,98	1,70 kN/m ³
Eq. Modelo 4.7	$\gamma_t = 1,47 \log qt/pa + 0,29 \log \frac{(u_2 - u_0)}{pa} + 0,19 Rf + 12,87 * \frac{G}{2,7}$	0,98	1,80 kN/m ³
Eq. Modelo 4.8	$\gamma_t = 1,54 \log qt/pa + 0,23 Rf + 12,9 * G/2,7$	0,98	1,78 kN/m ³

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.4.3 Normalidade nos modelos de equação

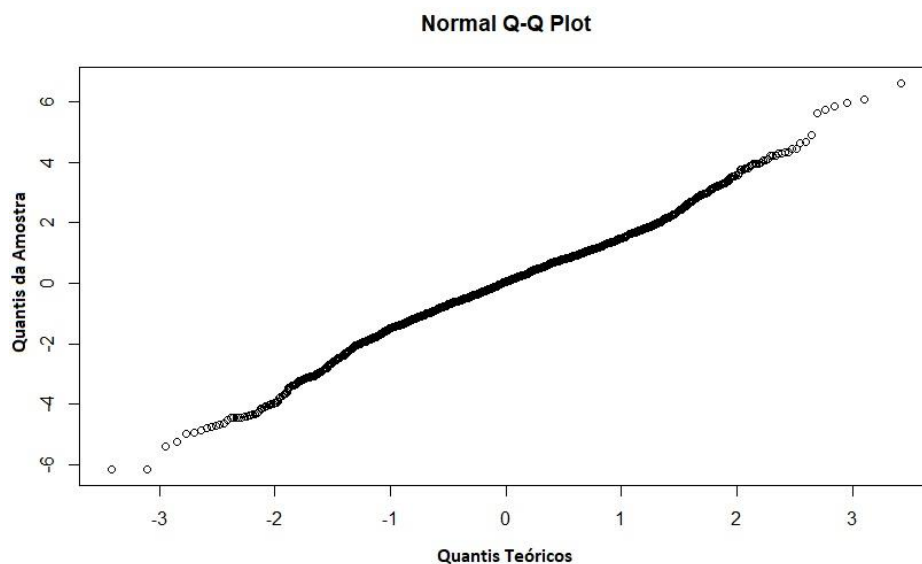
Devido ao banco de desenvolvimento ultrapassar os 1500 dados, a normalidade será apresentada através de gráficos que representam esta hipótese. Utilizou-se a teoria dos quantis, sendo apresentados por *Q-Q PLOT*. As Figuras de (4.3) a (4.6), apresentam os gráficos de normalidade para os seguintes Modelos de Equação (4.1), (4.3), (4.5), (4.7), onde nas duas primeiras os modelos se apresentam com presença de intercepto e nas duas últimas sem intercepto. As equações escolhidas para verificação de normalidade foram as que apresentam o parâmetro poropressão em sua formulação.

Figura 4.3 Gráfico quantil-quantil demonstrando a normalidade dos dados na Equação Modelo 4.1, com uso do intercepto



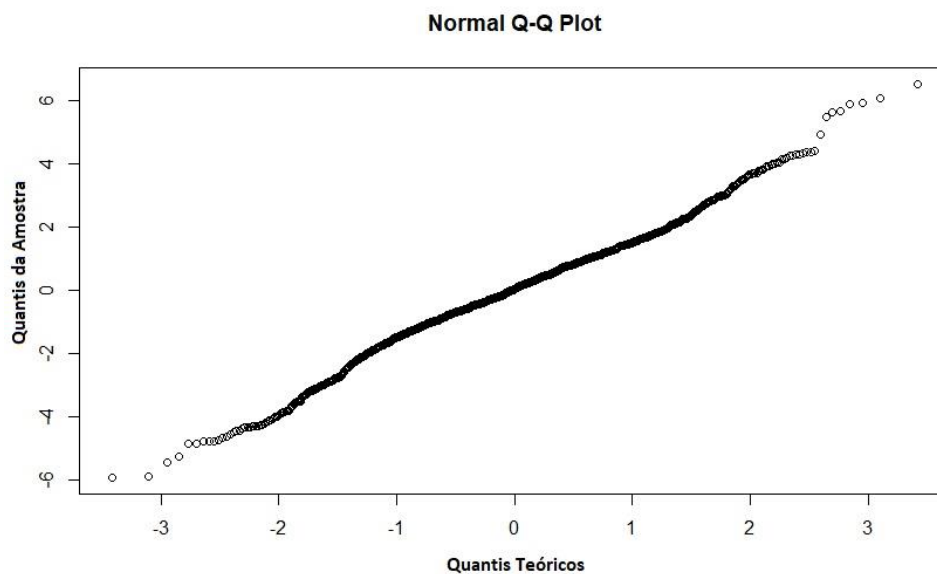
Fonte: Adaptado do software *R Studio* (2022)

Figura 4.4 Gráfico quantil-quantil demonstrando a normalidade dos dados na Equação Modelo 4.3, com uso do intercepto



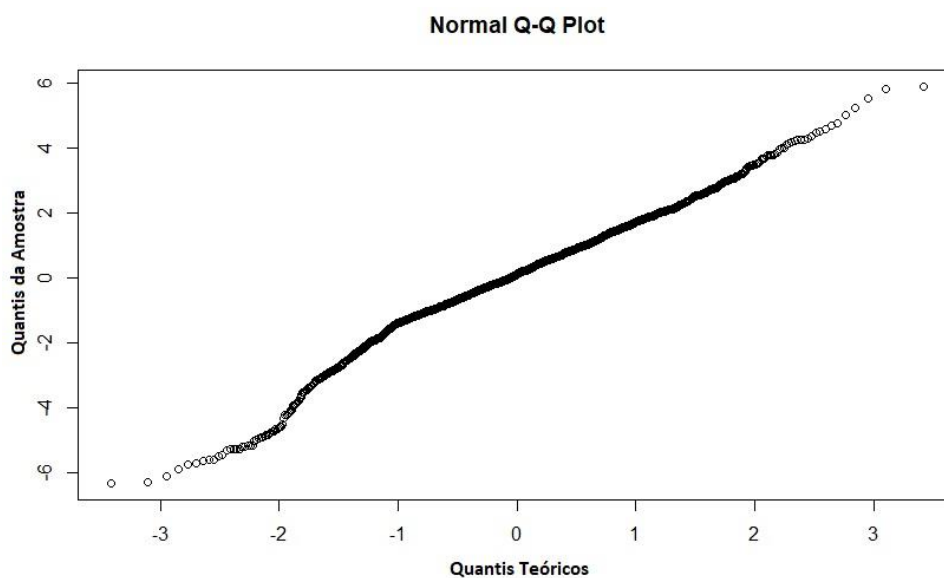
Fonte: Adaptado do software *R Studio* (2022)

Figura 4.5 Gráfico quantil-quantil demonstrando a normalidade dos dados na Equação Modelo 4.5, sem uso do intercepto



Fonte: Adaptado do software R Studio (2022)

Figura 4.6 Gráfico quantil-quantil demonstrando a normalidade dos dados na Equação Modelo 4.7, sem uso do intercepto



Fonte: Adaptado do software R Studio (2022)

Os gráficos apresentados, demonstram a normalidade dos dados utilizados nesta pesquisa e sua normalidade está presente em todas as regressões, com ou sem o uso do intercepto. Este tipo de inspeção visual faz parte da avaliação da aderência da distribuição dos dados.

4.5 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE EQUAÇÃO

Empregando o mesmo procedimento utilizado na verificação das equações presentes nas propostas de literatura, avaliou-se o coeficiente de correlação de Pearson (R), entre peso específico medido (banco de validação) *versus* peso específico estimado (equações modelo propostas neste estudo) para validação das equações. Através destas, obteve-se os valores presentes na Tabela (11) considerando o intercepto e na Tabela (12), sem considerar o intercepto.

Tabela 11 - Resultados obtidos na verificação dos modelos de equação considerando o intercepto

Equações Modelos	Coeficiente de correlação de Pearson (R)
Equação Modelo 4.1	$R = 0,80$
Equação Modelo 4.2	$R = 0,79$
Equação Modelo 4.3	$R = 0,56$
Equação Modelo 4.4	$R = 0,43$

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Nesta proposta, onde os modelos ainda não estão adimensionalizados, a correlação mais forte se deu com a Equação Modelo (4.1), porém existe pouca diferença para a Equação Modelo (4.2), o qual não conta com a presença do parâmetro poropressão.

Quando adimensionalizados os modelos, os valores apresentam uma correlação com valores bastante abaixo dos obtidos nas correlações dos modelos anteriores e até mesmo das propostas presentes na literatura. A correlação de menor intensidade, foi apresentada pela Equação Modelo (4.4), a qual é adimensional, não conta com o parâmetro poropressão e tem o intercepto presente em sua proposta. Com este valor de correlação entre a equação e o banco de amostras, não podemos afirmar que o parâmetro poropressão é descartável na equação, tendo em vista a correlação de valor superior que obtivemos com a presença de tal variável.

Tabela 12 - Resultados obtidos na verificação dos modelos de equação sem considerar o intercepto

Equações Modelos	Coefficiente de correlação de Pearson (R)
Equação Modelo 4.5	$R = 0,80$
Equação Modelo 4.6	$R = 0,80$
Equação Modelo 4.7	$R = 0,78$
Equação Modelo 4.8	$R = 0,77$

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Quando retirado o intercepto, todas as correlações se mostraram fortes e favoráveis, as equações obtiveram valores de 0,77 a 0,8. Mesmo quando feito uso de parâmetros adimensionais, as equações apresentaram valores superiores aos valores de correlação de Pearson obtidos na verificação de modelos presentes na literatura.

4.6 COMENTÁRIOS FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo do trabalho foi apresentada a metodologia de estimativa de modelos de equação para a determinação da propriedade peso específico do solo. O processo desenvolveu-se em análise de propostas existentes na literatura para solos naturais, através da correlação com banco de dados de validação desenvolvido neste estudo, o qual conta com 279 dados de diferentes tipos de solo. A parte estatística se desenvolveu com auxílio do *software R Studio*, ferramenta essencial para o avanço dos resultados desta pesquisa.

Além desta etapa de verificação, com a utilização do banco de dados de desenvolvimento, o qual conta com 1583 dados e igualmente desenvolvido neste estudo, fez-se propostas de modelos de equações para determinar o peso específico natural de um solo qualquer, com a densidade real dos grãos (G) variando amplamente e não se limitando a valores padrões de 2,5 a 2,7. A validação feita nas equações desenvolvidas nesta pesquisa, seguiu as mesmas premissas da verificação feita nas propostas presentes na literatura, permitindo avaliar qual equação é mais atrativa para o uso na Engenharia Geotécnica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo 5 resume as principais conclusões deste estudo, em conformidade com os objetivos apresentados no capítulo 1 e demais análises realizadas nesta pesquisa. Ao final, algumas sugestões são propostas para estudos futuros na mesma linha de pesquisa.

5.1 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar e propor correlações para estimativa do peso específico natural do solo a partir de resultados de ensaios CPTu, baseando-se na compilação de um banco de dados de resultados de ensaios em solos com ampla faixa de variação de densidade real dos grãos. Com o banco de dados formado, foram inicialmente analisadas as propostas de correlação de dados de CPTu com peso específico natural dos solos existentes na literatura. Na sequência foram analisadas as contribuições de cada variável na determinação do peso específico natural e posteriormente desenvolvidos modelos de correlação exclusivos desta pesquisa. Assim as considerações finais seguidas das conclusões são apresentadas de forma individualizadas para: o banco de dados (a), as análises de modelos de correção da literatura (b), o peso de cada variável na determinação do peso específico natural do solo (c), modelos desenvolvidos e validação (d).

a) Banco de dados

O Banco de dados foi desenvolvido com 1862 dados, sendo estes obtidos através de resultados de ensaios, retirados de trabalhos acadêmicos e outros bancos disponíveis na literatura. Para cada ponto considerado os valores médios dos resultados de CPT, imediatamente acima e abaixo do ponto, foram determinados e associados aos valores de pesos específico natural e densidade real dos grãos determinados diretamente a partir de amostras indeformadas. Os dados obtidos a partir de trabalho acadêmicos seguiram a mesma metodologia e só foram considerados onde se dispunha de todas as informações

devidamente determinadas. A estes dados foi agregado o banco de dados disponibilizado pelo professor Paul Mayne, com um total de 1019 pontos. No caso do banco de dados do referido professor, havia a falta de informação da densidade real dos grãos, a qual foi buscada na literatura.

Este banco de dados assim montado foi denominado de banco de dados geral. A partir deste banco de dados geral foram criados de forma aleatória dois bancos de dados específicos. Um contendo 1583 dados, denominados de dados de desenvolvimento, que foi utilizado para determinar as correlações desenvolvidas nesta pesquisa e outro denominado de banco de dados de validação para testar e validar as correlações propostas na literatura, bem como para as elaboradas com o banco de dados de desenvolvimento.

Conclui-se que o banco de dados geral é robusto e contempla todos os tipos de solos havendo uma predominância de solos argilosos. Os bancos de dados de desenvolvimento e de validação são similares em porcentual de cada tipo de solo o que confere excelente capacidade de análise e validação.

b) Propostas presentes na literatura

Das propostas presentes na literatura para solos naturais, sete correlações foram escolhidas, as mais comumente adotadas no meio técnico e as que apresenta algum rigor estatístico o que facilita a comparação. Estas correlações foram testadas no banco de dados de validação. As conclusões para a análise das propostas da literatura foram:

- Os parâmetros mais utilizados nas propostas existentes na literatura são os valores de q_t , f_s , u_2 , V_s , G , m_q , R_f ;

- A correlação mais fraca e de sentido oposto ao banco de validação, foi dada pela proposta de Mayne (2007), a qual utiliza da velocidade cisalhante (V_s) como parâmetro principal para estimar o peso específico natural do solo. A correlação além de intensidade baixa, ($R = -0,29$), tem sentido oposto ao banco de validação usado para a verificação;

- A proposta que alcançou a correlação mais forte foi a que, de forma adimensional, utiliza de parâmetros como: q_t , G , R_f e uma regressão não-linear, com a presença de logaritmo. Esta equação, proposta por Robertson e Cabal (2010b), baseou-se apenas em observações de outras equações e principalmente conhecimento prévio da influência de alguns parâmetros. Desta forma, não se tem valores como coeficiente de determinação (R^2) e desvio padrão, deixando em aberto parte da validação estatística geralmente utilizada para confirmar uma proposta. Todavia, foi testada e considerada positiva e aplicável pelos próprios autores e também se mostrou positiva e aplicável neste estudo.

c) Peso de cada variável na estimativa do peso específico do solo

A título de entendimento do peso de cada uma das variáveis na estimativa do valor do peso específico natural avaliou-se a contribuição isolada das seguintes variáveis: q_t , f_s , u_2 e G . Destas, concluiu-se:

- A variável poropressão obteve a correlação direta mais fraca com a propriedade peso específico, em relação as demais, o que fez com que cenários de exclusão deste parâmetro fossem montados, os quais confirmaram a pouca influência desta variável em alguns parâmetros estatísticos;

- A correlação direta mais forte entre parâmetro e peso específico do solo, se deu na relação desta propriedade com a variável densidade real dos grãos;

- Uma forte correlação foi apresentada entre as variáveis resistência de ponta e atrito lateral, indicando a existência de multicolinearidade entre ambas. Essa influência foi registrada pela autora neste estudo, mas não foi adotada na proposta dos modelos apresentados na sequência.

d) Modelos desenvolvidos e validação

O trabalho desenvolveu um total de 8 Equações Modelo para determinação da propriedade peso específico do solo. Das análises feitas na modelagem e validação das mesmas concluiu-se:

- Modelos de regressões lineares não são adequados na estimativa do peso específico natural dos solos;
- Modelos com regressões não-lineares, no caso o logaritmo, são adequados na estimativa do peso específico natural dos solos por obterem os melhores coeficientes de regressão;
- Os fatores que apresentam mais peso na estimativa do peso específico são a resistência de ponta, atrito lateral e densidade real dos grãos;
- Modelos concebidos de forma dimensional e adimensional mostraram coeficientes de regressão muito próximos;
- O valor da poropressão, u_2 , não se mostrou um dado que afetasse representativamente o coeficiente de determinação das equações, porém quando testado na correlação com o banco de dados de amostra, mostrou sua influência e se conclui que não se deve retirar a variável da equação;
- As Equações Modelo que obtiveram os melhores valores de coeficiente de determinação (R^2) foram as de regressão não-linear, com e sem a variável poropressão e sem a presença de intercepto;
- No processo de validação, a equação que não utilizou a poropressão, adimensional e que tinha em sua modelagem o intercepto, apresentou a correlação mais fraca com o banco de amostras;
- As equações que apresentaram melhor correlação com o banco de amostra, foram as equações dimensionais, com e sem intercepto e as adimensionais sem intercepto. Estas equações se apresentaram fortemente atrativas para o uso.

d.1) Modelo escolhido para proposição

Dentre as Equações Modelo propostas nesta pesquisa, tanto os cenários dimensionais quanto adimensionais foram positivos quando testados com o banco de dados. Porém, a necessidade de utilização da equação escolhida de forma internacional, faz com que os modelos adimensionais sejam priorizados. Dentre eles, os modelos que eliminam o intercepto possuem uma intensidade maior de correlação com o banco de validação, tanto utilizando o parâmetro poropressão, quanto excluindo o mesmo. A exclusão de um parâmetro que

mostrou qualquer influência, por menor que seja em uma regressão, alerta para o cuidado em sua exclusão.

Beneficiando-se destas conclusões, admite-se que a equação ideal se dá pela Equação Modelo 4.7, a qual apresentou um $R^2 = 0,98$, um desvio padrão de $1,8 \text{ kN/m}^3$ e uma correlação com o banco de validação de $R = 0,78$.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O ensaio *in-situ*, utilizando CPT e CPTu é a ferramenta disponível mais procurada no mercado de ensaios de solo. Se todo procedimento é utilizado corretamente, com as ferramentas indicadas, as medidas são bastante confiáveis e se pode utilizar para estimar as propriedades do solo através de correlações propostas na literatura. O peso específico é uma destas propriedades, fundamental em um projeto geotécnico. A necessidade de se estimar o peso específico para obtenção de diversos parâmetros geotécnicos, aumenta a necessidade de correlações que se adequem aos mais diversos tipos de solo. Dessa forma, as sugestões deste estudo para novas pesquisas são:

- Fortalecimento do banco de dados com uma maior parcela de dados oriundos de rejeitos de mineração em espacial com densidade real dos grãos maiores;
- Ampliação constante do banco de dados e reavaliação dos modelos de correlações propostos nesta dissertação e os já constantes da literatura;
- Elaboração de modelos de correlação específicos para distintos tipos de solo / materiais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502 – Rochas e Solos – Classificação**. Rio de Janeiro. 1995.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12069 (MB3406): Solo Ensaio de penetração de cone in situ (CPT) Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H.; RIBEIRO, L. F. M.; PEREIRA, E. L.; GOMES, R.C. **Avaliação da Densidade In Situ de uma Barragem de Rejeitos de Mineração de Ferro com o Penetrologger**. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. 2004.

AMARAL, G. D.; SILVA, V. L. e REIS, E. A. **Análise de Regressão Linear no Pacote R**. Relatório Técnico, Série Ensino RTE 001, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14653-3 – Avaliação de bens Parte 3: Imóveis rurais**. Rio de Janeiro. 2004.

ASTM. **Tentative Method for Deep Quase-static, Cone and Friction Cone Penetration Tests in soils, D3441-75T**, 1979.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística para Cursos de Engenharia e Informática**. 3ed. São Paulo: Atlas, 2010.

BEDIN, J. **Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da UFRGS, Porto Alegre, 2006.

BEDIN, J. **Estudo do Comportamento Geomecânico de Resíduos de Mineração**. Tese de doutorado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

BUDHU, Muni. **Soil mechanics fundamentals**. John Wiley & Sons, 2015.

BURNS, S. E.; MAYNE, P. W. **Small-and high-strain measurements of in situ soil properties using the seismic cone penetrometer**. Transportation Research Record, v. 1548, n. 1, p. 81-88, 1996

CAMACHO, D. L. D. **Reconstituição e caracterização de amostras de rejeito de minério de ferro**. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra, 2021.

CAMPANELLA, R. G.; ROBERTSON, P. K.; GILLESPIE, D. **Seismic cone penetration test**. In: Use of in situ tests in geotechnical engineering. ASCE, 1986. p. 116-130.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6.^a Rio de Janeiro: LCT, 1988.

CARDOSO JUNIOR, Carlos Rezende. **Estudo do comportamento de um solo residual de gnaiss não saturado para avaliar a influência da infiltração na estabilidade de taludes**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Principles of geotechnical engineering**. Cengage learning, 2013.

DEVORE, J.L. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências** / Jay L. Devore; [tradução Joaquim Pinheiro Nunes da Silva]. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

DUZZIONI, R. I. **Monitoramento hidrológico de turfeira nas montanhas do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro/SC**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da UFSC, Florianópolis, 2012.

FENTON, G.; GRIFFITHS, D.V. **Risk assessment in geotechnical engineering**. New York: John Wiley & Sons, 2008.

GNANADESIKAN, R.; WILK, M. B. **Probability plotting methods for the analysis of data**. Biometrika, v. 55, n. 1, p. 1-17. United Kingdom: Oxford University Press, 1968.

HLENKA, L. **Estudo dos efeitos da velocidade de carregamento na estimativa de parâmetros geotécnicos em resíduos de mineração de zinco**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da UFRGS, Porto Alegre, 2012.

HU, L.; Wu, H; Zhang, L; Zhang, P. & Wen, Q. **Geotechnical properties of mine tailings**. Journal of Materials in Civil Engineering, V. 29, n. 2, p.1-10. London United Kingdom, 2017.

IGNÁCIO, S. A. **Importância da estatística para o processo de conhecimento e tomada de decisão**. Revista Paranaense de Desenvolvimento, n. 118, p. 175-192, 2010.

KOLAY, E.; BASER, T. **Estimating of the dry unit weight of compacted soils using general linear model and multi-layer perceptron neural networks**. Applied Soft Computing, v. 18, p. 223-231, 2014.

KOZAK, A.; KOZAK, R; A. **Notes on regression through the origin**. The Forestry Chronicle, v. 71, n. 3, p. 326-330, 1995.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics SI version**. John Wiley & Sons, 1969.

LENGKEEK, H. J.; DE GREEF, J.; JOOSTEN, S. **CPT based unit weight estimation extended to soft organic soils and peat**. In: Cone Penetration Testing 2018. CRC Press, 2018. p. 389-394.

LEOTTI, V. B.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. **Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação**. Revista HCPA. Porto Alegre. Vol. 32, no. 2 (2012), p. 227-234, 2012.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K. & POWELL, J.J.M. **Cone Penetration Testing**. Londres: Blackie Academic & Professional. 1997.

LUNNE, T. **The Fourth James K. Mitchell Lecture**. Geomechanics and Geoengineering, v. 7, n. 2, pág. 75-101. Londres: Taylor & Francis, 2012.

MASCARENHA, M.M.A. **Influência da microestrutura no comportamento hidro-mecânico de uma argila siltosa não saturada incluindo pequenas deformações**. Tese de doutorado em Geotecnia apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MAYNE, P. W. **Cone penetration testing**. Transportation Research Board, 2007.

MAYNE, P. W.; PEUCHEN, J.; BOUWMEESTER, D. **Soil unit weight estimation from CPTs**. sat, v. 227, p. 3, 2010.

MAYNE, P. W.; PEUCHEN, J. **Unit weight trends with cone resistance in soft to firm clays**. In: Geotechnical and Geophysical Site Characterization: Proceedings of the 4th International Conference on Site Characterization ISC-4. Taylor & Francis Books Ltd, 2013. p. 903-910.

MAYNE, P. W. **Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests**. In: Proceedings, 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing. 2014. p. 47-73.

MITCHELL, J; K; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. New York: John Wiley & Sons, 2005.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2ª. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.

MILONAS, J. G. **Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeitos de minério de ferro em aterro hidráulico**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

NIERWINSKI, H. P. **Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de mineração**. Tese de doutorado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2019.

NIERWINSKI, H. P., REUS, A., HEIDEMANN, M., ODEBRECHT, E., BARRA, B. S., HASTENPFLUG, D., & PÉREZ, Y. A. G. **Caracterização Física de Amostras de Rejeito de Mineração de Bauxita e Ouro**. Brazilian Applied Science Review, v. 4, n. 6, p. 3530-3544, 2020.

ODEBRECHT, Edgar. **Notas de Aula: Investigações Geotécnicas**. 12 aug. 2020, 30 nov. 2020. Notas de Aula – PPGECC UDESC.

ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução a mecânica dos solos dos estados críticos**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

POWELL, J.J.M.; DHIMITRI, L. **Watch out for the use of global correlations and “blackbox” interpretation of CPTU data**. In: 5th 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. Taylor & Francis Group Ltd, 2022. p. 651-656.

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

QI, Jilin; MA, Wei; SONG, Chunxia. **Influence of freeze–thaw on engineering properties of a silty soil**. Cold regions science and technology, v. 53, n. 3, p. 397-404, 2008.

RABARIJOELY, Simon. **A Bayesian approach in the evaluation of unit weight of mineral and organic soils based on dilatometer tests (DMT)**. Applied Sciences, v. 9, n. 18, p. 3779, 2019.

RAO, C. R. **Statistics and truth: putting chance to work**. 2ed. Singapura: World Scientific, 1997

ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. L. **Estimating soil unit weight from CPT**. In: 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. USA, 2010. p. 2-40.

ROBERTSON, P.K.; CABAL, K.L. **Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering**. 6º ed. California: Gregg Drilling & Tests Inc., 2014.

SCHNAID, F. **Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. Oficina de Textos. São Paulo-SP, 2000.

SCHNAID, F. **In situ testing in geomechanics: the main tests**. CRC Press, 2008.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo e suas aplicações a engenharia de fundações**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SILVA, W. P. da. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001)**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1977.

WALPOLE, R. E., MYERS, R. H., MYERS, S. L., YE, K. **Probability & Statistics for engineers & scientists**. 8ª Ed., Pearson, 2009.

WILK, M.B; GNANADESIKAN, R. **Probability plotting methods for the analysis of data.** Biometrika, 1968, 55, 1, p.1.

YULIANTO, F. E. et al. **Characteristics of Palangkaraya fibrous peat.** In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. p. 05008.

YUSA, M. et al. **Penetration Resistance of Bengkalis' Peat From Hand Cone Penetration Test.** In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. p. 012120.