

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

JOSÉ THIAGO DA SILVA MACIEL

**USO COMBINADO DE ENSAIOS GEOFÍSICOS E GEOTÉCNICOS PARA
AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DO SOLO**

Cajazeiras-PB
2022

JOSÉ THIAGO DA SILVA MACIEL

**USO COMBINADO DE ENSAIOS GEOFÍSICOS E GEOTÉCNICOS PARA
AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação do Prof. Bruno Andrade de Freitas e Coorientação do Dr. Tiago de Jesus Souza.

Cajazeiras-PB
2022

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Suellen Conceição Ribeiro CRB-2218

M152u Maciel, José Thiago da Silva

Uso combinado de ensaios geofísicos e geotécnicos para avaliação de parâmetros do solo/ José Thiago da Silva Maciel. – Cajazeiras/PB: IFPB, 2022.

87f.:il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-IFPB, Campus Cajazeiras. Cajazeiras, 2022.

Orientador(a): Prof. Bruno Andrade de Freitas; Coor. Dr. Tiago de Jesus Souza.

1. Ensaio geofísico. 2. Ensaio geotécnico. 3. Solo.

I. Maciel, José Thiago da Silva. II. Título

CDU: 624 M152u

JOSÉ THIAGO DA SILVA MACIEL

**USO COMBINADO DE ENSAIOS GEOFÍSICOS E GEOTÉCNICOS PARA
AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 18 de Março de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Bruno Andrade de Freitas

Me. Bruno Andrade de Freitas – IFPB-Campus Patos
Orientador

Tiago de Jesus Souza

Dr. Tiago de Jesus Souza – UFSCAR
Coorientador

P. Maciel

M.^a Priscila de Souza Maciel – IFAL-Campus Coruripe
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais em especial, por toda a dedicação e apoio para que eu tivesse uma boa educação e chegasse onde cheguei até agora.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me fornecido a força que eu precisei nos momentos mais difíceis e por ter agido de forma a me colocar no caminho que eu sonhei trilhar.

Agradeço a meus pais por todo esforço que fizeram para que seus filhos tivessem uma boa educação. Aos meus irmãos Antônia e Iarly por todo apoio e companhia que me proporcionaram nessa caminhada.

Agradeço ao professor Gastão pela ajuda que tornou possível a realização deste trabalho. Aos meus orientadores Bruno Freitas e Tiago Souza pela disponibilidade e por todas as orientações que enriqueceram bastante o meu trabalho.

Agradeço ao Harry G. Poulos bem como ao Tiago Souza por terem fornecido os dados que permitiram a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus grandes amigos: Júlio César, José Augusto, Jeferson e José Iago (Brejo), por toda a amizade e pelo trabalho de equipe, pois eu jamais conseguiria chegar tão longe sem eles.

Agradeço aos demais amigos que de alguma forma foram especiais em minha trajetória até aqui. Aos meus amigos que o curso de Engenharia Civil me deu: Iane, Iasmim, Luan, Alda, Andreza e Roberto, por todo o apoio e os bons momentos vividos durante o curso.

À minha amiga Luz de Esperanza, por todos os bons momentos de conversa e descontração, que me foram ainda mais preciosos no período de pandemia. À minha amiga Josefa Fernanda de Albuquerque, por todo o incentivo e principalmente por cada palavra de conforto que tanto me ajudou em meus momentos de dificuldade.

Aos meus amigos Vinícius, e James por todos os momentos de descontração. À minha amiga Mariane, pelo apoio e amizade desde o ensino médio. A Andreza Aquino pelo apoio e amizade, mesmo que distantes geograficamente. Agradeço ao IFPB por ter me acolhido, e ser uma segunda casa durante essa jornada, e também aos funcionários que zelaram com muito carinho do *Campus*.

Agradeço à toda a equipe de projetos da Terrasol Engenharia, por todo o apoio e torcida pelo meu sucesso nesse trabalho.

Por fim, agradeço a mim mesmo por nunca ter desistido, por sempre ter dado meu melhor, por todo o trabalhado duro, por sempre buscar ajudar sem pedir nada, e por ter seguido em frente mesmo com todas as dificuldades e até nos momentos em que parecia não haver solução, agradeço a mim mesmo por jamais perder a fé.

RESUMO

Este trabalho trata de uma análise comparativa entre os resultados obtidos por meio de ensaios geotécnicos convencionais e os resultados encontrados a partir de métodos geofísicos para a caracterização do solo. O objetivo principal é compreender como a utilização da geofísica pode contribuir para a determinação de parâmetros geotécnicos. Assim, buscou-se por trabalhos consagrados na literatura que abordam essas duas metodologias de investigação do solo, para que fosse possível utilizar os dados desses estudos como base para este trabalho. Foram selecionados três estudos de caso, sendo um referente à caracterização do solo da Asa Sul de Brasília, o segundo no campo experimental da Universidade do Texas – EUA e o terceiro sendo realizado no campo experimental da Escola de Engenharia de São Carlos. Através da aplicação de correlações entre os valores de velocidade de propagação da onda cisalhante (V_s) e parâmetros de projeto como o índice de resistência à penetração (N_{SPT}), o módulo de cisalhamento (G_0), resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), módulo de Poisson (ν) e módulo de deformabilidade (E), foi possível realizar a caracterização do solo por meio de ensaios sísmicos, apresentando uma boa acurácia nos resultados quando confrontados com os resultados obtidos em relatórios de sondagem SPT realizados nos campos de estudo. As correlações voltadas para o tipo de solo encontrados nos sítios apresentaram um coeficiente de variação inferior a 50% para a maioria dos resultados, enquanto correlações mais genéricas apresentaram dispersões acima de 50%. No campo experimental de São Carlos, foi possível ainda realizar um comparativo entre os parâmetros estimados através dos resultados de ensaios *Cross-hole*, *Down-hole* e cone sísmico, permitindo avaliar a aplicabilidade desses ensaios em pequenas profundidades.

Palavras-Chave: Métodos Geofísicos. Métodos sísmicos. Ensaios geotécnicos. Correlações. SPT.

ABSTRACT

This work deals with a comparative analysis between the results obtained through conventional geotechnical tests and the results found from geophysical methods for soil characterization. The main objective is to understand how the use of geophysics can contribute to the determination of geotechnical parameters. Thus, we searched for works established in the literature that approach these two methodologies of soil investigation, so that it was possible to use the data from these studies as a basis for this work. Three case studies were selected, one referring to the characterization of the soil of Asa Sul de Brasília, the second in the experimental field of the University of Texas - USA and the third being carried out in the experimental field of EESC/USP - São Carlos. By applying correlations between the values of shear wave propagation velocity (V_s) and design parameters such as the penetration resistance index (NSPT), the shear modulus (G_0), undrained shear strength (S_u), Poisson's modulus (ν) and modulus of deformability (E), it was possible to carry out the characterization of the soil through seismic tests, presenting a good accuracy in the results when compared with the results obtained in SPT drilling reports carried out in the fields of study, being that the correlations focused on the type of soil found in the sites showed a coefficient of variation lower than 50% for most results, while more generic correlations showed dispersions above 50%. In the São Carlos experimental field, it was also possible to make a comparison between the estimated parameters through the results of Cross-hole, Down-hole and seismic cone tests, allowing to evaluate the applicability of these tests in small depths.

Keywords: Geophysical Methods. Seismic methods. Geotechnical tests. Correlations. SPT.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais Índices que indicam o estado de solos.....	23
Quadro 2 – Aplicabilidade e uso de ensaios <i>in situ</i>	24
Quadro 3 – Ensaios para a determinação das propriedades dinâmicas dos solos.....	29
Quadro 4 – Correlações propostas entre N_{spt} e V_s	33
Quadro 5 – Propriedades comuns de solos argilosos	35
Quadro 6 – Tipos de solos e sua correlação com o Módulo de Poisson.....	35
Quadro 7 - Valores para o módulo de deformabilidade em argilas saturadas.....	36
Quadro 8 – Resultados das sondagens SPT na Seção 115 Sul	42
Quadro 9 – Resultados das sondagens SPT na Seção 215 Sul	43
Quadro 10 – Caracterização do perfil de solo da quadra 115 Sul a partir dos ensaios sísmicos.	64
Quadro 11 – Caracterização do perfil de solo da quadra 215 Sul a partir dos ensaios sísmicos.	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da Geotecnia no último século	18
Figura 2 – Parâmetros obtidos a partir do ensaio SPT por meio de correlações	19
Figura 3 – Piezocone Sísmico (SCPTU)	26
Figura 4 – Obtenção dos dados de ondas superficiais através do ensaio MASW	30
Figura 5 – Desenho esquemático de um ensaio <i>Cross-hole</i>	31
Figura 6 – Desenho esquemático dos ensaios (a) <i>Up-hole</i> e (b) <i>Down-hole</i>	31
Figura 7 – Croqui com localização dos furos de sondagem utilizados para construção da seção geológico-geotécnica da 215 Sul.	39
Figura 8 - Croqui com localização dos furos de sondagem utilizados para construção da seção geológico-geotécnica da 115 Sul.	40
Figura 9 – Croqui com localização da linha sísmica realizada na 215 Sul.	40
Figura 10 - Croqui com localização da linha sísmica realizada na 115 Sul.	41
Figura 11 – Seção 2D de velocidades mínimas ($V_{s,min}$) da SQS 215, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.	44
Figura 12 - Seção 2D de velocidades mínimas ($V_{s,min}$) da SQS 115, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.	44
Figura 13 - Seção 2D de velocidades máximas ($V_{s,max}$) da SQS 215, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.	45
Figura 14 - Seção 2D de velocidades máximas ($V_{s,max}$) da SQS 115, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.	45
Figura 15 – Locação das sondagens realizadas no campo geotécnico experimental da Universidade Nacional do Texas	47
Figura 16 – Perfis de sondagem para o campo experimental do Texas	48
Figura 17 – Locação dos ensaios de campo realizados no campo experimental da EESC/USP – São Carlos.	49
Figura 18 – Gráficos dos valores de N_{SPT} e N_E com desvio padrão (em tracejado) para a quadra 215 Sul.	53
Figura 19 – Gráficos de CV para a quadra 215 Sul.	54
Figura 20 - Gráficos dos valores de N_{SPT} e N_E com desvio padrão (em tracejado) para a quadra 115 Sul.	56
Figura 21 – Gráficos de CV para a quadra 115 Sul.	58

Figura 22 - Gráficos dos valores de N_{SPT} e N_E com desvio padrão (em tracejado) para o campo Experimental do Texas, considerando os perfis de sondagem nas direções Norte-Sul e Leste-Oeste.	59
Figura 23 – CV para o campo experimental do Texas	60
Figura 24 – Gráficos para os parâmetros obtidos através de diferentes ensaios no campo experimental de São Carlos	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de V_s para geomateriais.....	28
Tabela 2 – Classificação dos Solos segundo a NBR 6484/2020	32
Tabela 3 – Fatores que afetam o módulo de cisalhamento em solos arenosos e coesivos	34
Tabela 4 – Valores de V_s e de densidade obtidos por meio de MASW na SQS 215.....	46
Tabela 5 – Valores de V_s e de densidade obtidos por meio de MASW na SQS 115.....	46
Tabela 6 – Valores de V_s para as direções Norte-Sul e Leste-Oeste	48
Tabela 7 – Índices físicos médios para o campo experimental de São Carlos	50
Tabela 8 – Dados de V_s obtidos por meio do ensaio <i>Down-hole</i> para o campo experimental de São Carlos.....	50
Tabela 9 – Dados de V_s obtidos por meio de ensaio <i>Cross-hole</i> para o campo experimental de São Carlos.....	50
Tabela 10 -Dados de V_s obtidos por ensaio de SCPT para o campo experimental de São Carlos	50
Tabela 11 – Valores de N estimados a partir de V_s para o perfil de sondagem 1/215.....	51
Tabela 12 - Valores de N estimados a partir de V_s para o perfil de sondagem 2/215.....	52
Tabela 13 - Valores de N estimados a partir de V_s para o perfil de sondagem 4/215.....	52
Tabela 14 – Coeficientes de Variância (em %) para os resultados obtidos na quadra 215 Sul.	54
Tabela 15 – Valores de N estimados a partir de V_s para o perfil de sondagem 1/115.....	55
Tabela 16 - Valores de N estimados a partir de V_s para o perfil de sondagem 2/115.....	55
Tabela 17 - Valores de N estimados a partir de V_s para o perfil de sondagem 4/115.....	56
Tabela 18 – Valores de CV (em %) para a quadra 115 Sul.....	57
Tabela 19 - Valores de N estimados a partir de V_s na direção Norte-Sul para o Campo Experimental do Texas.	58
Tabela 20 - Valores de N estimados a partir de V_s na direção Leste-Oeste para o Campo Experimental do Texas.	59
Tabela 21 – Cv (em %) para o campo experimental do Texas.....	60
Tabela 22 - Valor médio de N_e obtido por Poulos (2021) para os valores do estudo de Briaud e Gibbens (1994)	61
Tabela 23 – Valores de V_P para a quadra 215 Sul.....	62
Tabela 24 – Valores de V_P para a quadra 115 Sul.....	62

Tabela 25 – Parâmetros obtidos através de ensaio <i>cross-hole</i>	64
Tabela 26 – Parâmetros obtidos através de ensaio <i>down-hole</i>	65
Tabela 27 – Parâmetros obtidos através de ensaio SCPT.....	65

LISTA DE SÍMBOLOS

N_{SPT} - Índice de resistência à penetração

N_E - N_{SPT} estimado a partir de correlações

G_0 - Módulo de cisalhamento máximo

$N_{E,MED}$ - N_E médio

V_S - Velocidade de propagação da onda cisalhante S

V_P - Velocidade de propagação da onda de compressão P

Φ' - Ângulo de Atrito

S_u - Resistência ao cisalhamento não drenada

m_v - Módulo de variação volumétrico

K_0 - Coeficiente de empuxo no repouso

OCR - Razão de pré-adensamento

q_c - Resistência de ponta do cone

f_s - Atrito lateral entre o solo e a parede cilíndrica do cone

E - Módulo de deformabilidade

ν - Módulo de Poisson

W - Umidade

e - Índice de vazios

n - Porosidade

S - Grau de saturação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	21
2.1 OBJETIVO GERAL.....	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3 REFERENCIAL TEÓRICO	22
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	22
3.2 INVESTIGAÇÕES DIRETAS.....	24
3.3 MÉTODOS GEOFÍSICOS	26
3.3.1 Métodos Sísmicos.....	27
3.3.2 MASW.....	30
3.3.3 Ensaios Down-hole e Cross-hole.....	30
3.4 CORRELAÇÕES ENTRE MÉTODOS GEOFÍSICOS E MÉTODOS CONVENCIONAIS	32
3.4.1 Correlações entre V_S e N_{SPT}	32
3.4.2 Correlações entre G_0 e V_S	34
3.4.3 Correlações entre S_u e V_S	34
3.4.4 Correlações entre ν e V_S	35
3.4.5 Correlações entre E e V_S	36
4 MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	37
4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DA ASA SUL DE BRASÍLIA ..	39
4.2.1 Sondagem SPT	41
4.2.2 Sondagem Geofísica	43

4.3 CAMPO GEOTÉCNICO EXPERIMENTAL DA UNIVERSIDADE NACIONAL DO TEXAS	46
4.3.1 Sondagem SPT	47
4.3.2 Sondagem Geofísica	48
4.4 CAMPO EXPERIMENTAL DE SÃO CARLOS	49
4.4.1 Ensaio de Laboratório	49
4.4.2 Sondagem Geofísica	50
5 RESULTADOS	51
5.1 N-ESTIMADO X N-SPT	51
5.1.1 Asa Sul de Brasília	51
5.1.2 Campo Geotécnico Experimental do Texas	58
5.2 PARÂMETROS DE PROJETO ESTIMADOS A PARTIR DE V_s	61
5.3 PARÂMETROS DE PROJETO ESTIMADOS POR DIFERENTES ENSAIOS GEOFÍSICOS	64
6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A – RESULTADOS DE N ESTIMADOS PARA A QUADRA 115 SUL	72
APÊNDICE B – RESULTADOS DE N ESTIMADOS PARA A QUADRA 215 SUL.....	75
APÊNDICE C – RESULTADOS DE N ESTIMADOS PARA O CAMPO EXPERIMENTAL DO TEXAS	78
APÊNDICE D – RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE PROJETO OBTIDOS A PARTIR DE V_s PARA A QUADRA 215 SUL.....	80
APÊNDICE E – RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE PROJETO OBTIDOS A PARTIR DE V_s PARA A QUADRA 115 SUL.....	82
APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS <i>CROSS-HOLE</i> NO CAMPO EXPERIMENTAL DE SÃO CARLOS	84

APÊNDICE G – RESULTADOS DOS ENSAIOS <i>DOWN-HOLE</i> NO CAMPO EXPERIMENTAL DE SÃO CARLOS	85
APÊNDICE H – RESULTADOS DOS ENSAIOS SCPT PARA O CAMPO EXPERIMENTAL DE SÃO CARLOS	86

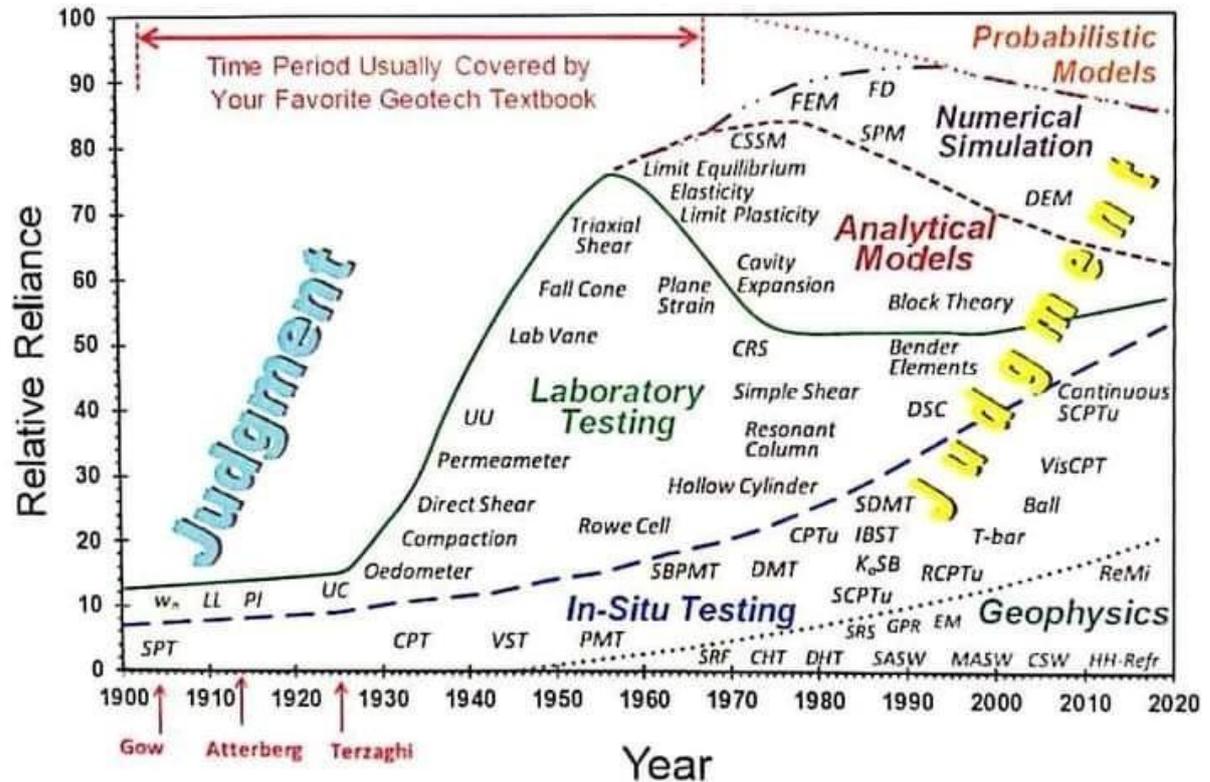
1 INTRODUÇÃO

O projeto geotécnico é de grande responsabilidade em uma obra, tendo em vista que as informações obtidas por ele são indispensáveis para a previsão dos custos fixos associados ao projeto e à sua solução (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Em virtude disso, são necessários muitos cuidados ao se realizar projetos geotécnicos como fundações e obras de contenção, para que se tenha um projeto seguro, econômico e dentro do prazo exigido. Um dos cuidados principais é ter um bom conhecimento do perfil geotécnico do solo, pois este será imprescindível para a escolha da solução de intervenção.

Para a investigação geotécnica, a norma da ABNT (2019), NBR 6122/2019 - Projeto e Execução de Fundações, orienta que sejam realizadas, no mínimo, sondagens a percussão (SPT - *Standard Penetration Test*) para determinar a estratigrafia e classificação dos solos, a posição do nível d'água e o índice de resistência à penetração (N_{SPT}). Além disso, ele serve como indicativo da densidade de solos granulares, e é aplicado também na identificação da consistência de solos coesivos, e mesmo de rochas brandas (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). A depender das peculiaridades do solo ou do projeto, podem ser necessárias investigações complementares como sondagens rotativas, ensaio de cone CPT (do inglês *Cone Penetration Test*), ensaio de piezocone CPTU (*Piezocone Penetration Test*), ensaio dilatométrico DMT (*Dilatometric Marchetti Test*), métodos geofísicos, entre outros. Segundo Rocha e Giacheti (2018), tem sido cada vez mais importante entender o comportamento dos solos, principalmente nos solos tropicais, como é o caso do Brasil, e para isso devem-se buscar novos modelos e correlações que sejam mais precisos do que os modelos desenvolvidos pela Mecânica dos Solos Clássica.

A Figura 1 apresenta a evolução da geotecnia nos últimos 100 anos, onde mostra que os métodos mais usuais de estudos geotécnicos se foram desenvolvidos na metade inicial do Século XX, e desde então surgiram várias outras metodologias que podem oferecer uma grande contribuição à geotecnia.

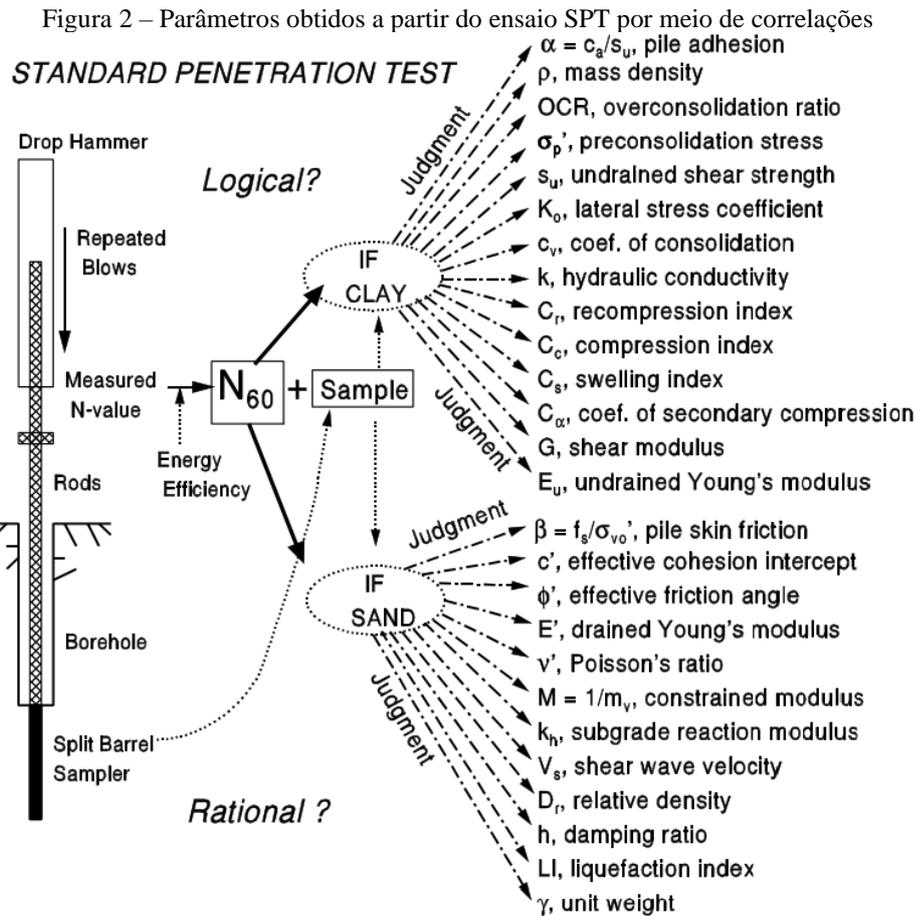
Figura 1 – Evolução da Geotecnia no último século



Fonte: LANCASSE, 1985 *apud* MAYNE, 2000.

Devido à grande variabilidade natural e singularidade global dos geomateriais, além do número de testes e amostras indeformadas ser restringido por questões orçamentárias, o conjunto completo de propriedades intrínsecas, bem como parâmetros de engenharia, são raramente conhecidos com um alto grau de precisão ou confiabilidade (MAYNE, 2000, tradução nossa). Ainda segundo Mayne (2000), são necessários vários testes de laboratório para a determinação discreta de parâmetros selecionados, o que envolve um alto custo além de demandar um longo tempo para a execução.

Apesar do SPT ser reconhecido como a mais popular e econômica ferramenta de investigação geotécnica em praticamente todo o mundo, Mayne (2000) aponta que é bastante irrealista acreditar que apenas este ensaio pode fornecer todas as informações adequadas e confiáveis para uma análise do solo. Ainda segundo o autor, o valor do N_{SPT} é frequentemente utilizado em correlações empíricas para gerar um grande número de parâmetros geotécnicos como mostra a Figura 2, sendo utilizados em análise computacionais, assim ele alerta que a confiança nesse resultado é imprópria e muitas vezes acarreta em projetos antieconômicos e não ideais para obras geotécnicas.



Fonte: MAYNE, 2000.

Assim, alguns autores têm sugerido a utilização de técnicas híbridas, com a utilização da geofísica, para a estimativa de parâmetros do solo sem a necessidade da aplicação de correlações empíricas (SOUZA, 2011). Além disso, os métodos geofísicos apresentam a vantagem de poderem realizar uma investigação em área, ao contrário do ensaio SPT, que trata de uma investigação pontual, e oferecem um bom suporte para encontrar parâmetros de forma a melhorar o entendimento sobre o comportamento dos solos. Eles consistem em caracterizar o solo a partir das características físicas indiretas tais como a velocidade de propagação de ondas mecânicas ou a resistividade elétrica (CASTRO *et al.*, 2016). Fonseca (2008) classifica estes como sísmicos, elétricos, eletromagnéticos e técnicas mistas (geotécnicas e geofísicas), podendo atuar na superfície ou entre furos no solo.

Nesse sentido, em virtude da grande variedade de métodos geofísicos, é necessário que se conheça quais os métodos que oferecem uma maior contribuição ao projeto geotécnico, de forma a se obter um dimensionamento mais assertivo e com um menor custo, já que projetos desse tipo normalmente são feitos utilizando fatores de segurança elevados devido às incertezas

do solo, o que encarece ainda mais a obra. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise do uso combinado de ensaios geofísicos e geotécnicos na estimativa de parâmetros do solo utilizados em projeto geotécnicos, identificando como eles podem complementar os métodos de investigação mais comumente utilizados de forma a otimizar o dimensionamento geotécnico de forma segura e econômica, sendo realizado um estudo da arte sobre os principais métodos utilizados, enfatizando aqueles que utilizam de prospecção sísmica.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo estão delineados os objetivos do Trabalho de Conclusão do Curso (TCC).

2.1 OBJETIVO GERAL

Compreender como a utilização de métodos geofísicos podem contribuir para a determinação de parâmetros geotécnicos do solo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- investigar os principais métodos geofísicos aplicados no estudo geológico de obras geotécnicas por meio revisão bibliográfica;
- identificar as correlações existentes entre os parâmetros obtido com os métodos geofísicos (MASW e *Cross-Hole*) e os parâmetros obtidos com os métodos de investigação mais comumente utilizados no dimensionamento geotécnico (ensaios de sondagem à percussão SPT);
- resgatar trabalhos consagrados na literatura que abordem estudos de caso em que foram empregados métodos sísmicos em estudos geotécnicos, juntamente com o SPT;
- comparar os resultados encontrados no ensaio SPT com os valores estimados a partir das resultados de ensaios geofísicos *Cross-Hole* e MASW;
- comparar os resultados obtidos entre diferentes métodos de aquisição sísmica (SCPT, *Cross-hole* e *Down-hole*);
- realizar uma análise sobre a eficácia das correlações aplicadas nesses estudos e como aperfeiçoá-las;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão explicados conceitos importantes que devem estar presentes em projetos geotécnicos, como a caracterização do solo e como ela pode ser feita através de métodos diretos ou por métodos geofísicos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Um dos fatores mais importantes ao se realizar um projeto de engenharia é entender o comportamento do solo. É necessário que se entenda como o solo reage quando submetidos ao corte, suporte e perfurações advindas da atuação humana, seja devido às construções ou por outras atividades, e que podem provocar nesse solo uma deformação, amortecimento, movimento ou uma resistência ao esforço desprendido (FERNÁNDEZ, 2017). A caracterização do solo, portanto, deve ser executada de forma a definir o perfil geológico, o que inclui a identificação das camadas de solo, espessura e o tipo de solo, posição do nível de água e parâmetros mecânicos e hidráulicos de cada camada (ROCHA, GIACHETI; 2017).

De acordo com Kumar *et al* (2013), o solo é geralmente considerado como um sistema de três fases (ar, água e sólidos), e a interação entre elas sob a aplicação de carregamentos estáticos e/ou dinâmicos causa mudanças significativas nas características desse sistema (tradução nossa). Assim, para identificar o estado do solo, são utilizados índices físicos que correlacionam os pesos e volumes das fases dos solos como indicado no Quadro 1.

Outros parâmetros, ligados ao comportamento dinâmico do solo, são citados por Kumar *et al* (2013), como a velocidade de onda cisalhante (V_s), variação da rigidez ou redução do módulo de amortecimento do material com níveis de deformação e parâmetros suscetíveis de liquefação (tradução nossa). Schnaid e Odebrecht (2012) citam também outros parâmetros importantes como ângulo de atrito interno do solo (Φ'), resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), módulo de variação volumétrica (m_v), módulo cisalhante (G_0), coeficiente de empuxo no repouso (K_0) e razão pré-adensamento (OCR). No Quadro 2, são mostrados esses parâmetros e a aplicabilidade de alguns ensaios para obtê-los.

Quadro 1 – Principais Índices que indicam o estado de solos

Índices	Símbolos	Definições
Relação entre pesos		
Umidade	w	Relação entre o peso da água e o peso dos sólidos. Em geral, os teores variam entre 10 e 40%.
Relação entre Volumes		
Vazios	e	Relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas. Em geral os valores se situam entre 0,5 e 1,5 (adimensional)
Porosidade	n	Relação entre o volume de vazios e o volume total. Normalmente os valores variam de 30 a 70%
Grau de Saturação	S	Relação entre o volume de água e o volume de vazios. Varia entre zero e 100% (solo saturado)
Relação entre Pesos e Volumes		
Peso Específico dos Sólidos (ou dos Grãos)	y_s	Relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume. Solos em geral, situam próximo a 27kN/m ³ , solos arenosos 26,5 kN/m ³ e argilas lateríticas 30 kN/m ³ .
Peso Específico da água	y_w	Adota-se o valor igual a 10kN/m ³
Peso Específico Natural	y_n	Relação entre o peso total do solo e seu volume total. Solos em geral situam entre 19 e 20kN/m ³
Peso Específico Aparente Seco	y_d	Relação entre o peso dos sólidos e o volume total. Situa-se entre 13 e 19kN/m ³
Peso Específico Aparente Saturado	y_{sat}	Corresponde ao peso específico do solo saturado sem variação de volume. Em geral, situa-se em valores próximos à 20kN/m ³ .
Peso Específico Submerso	y_{sub}	É o peso do solo quando submerso, ou o peso específico natural menos o peso específico da água. Situa-se, em geral, com valores próximos a 10kN/m ³
Massa Específica	μ	Relação entre a matéria e o volume. O peso específico é o produto entre μ e g (aceleração da gravidade). Expresso em Ton/m ³ e g/cm ³ .

Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

Nesse sentido, a determinação sobre o tipo de ensaio a ser realizado depende das características do solo e dos parâmetros que serão medidos. Por exemplo, o ensaio SPT pode ser utilizado para determinar o perfil do solo e o ângulo de atrito, mas não pode determinar o módulo de cisalhamento ou o coeficiente de empuxo no repouso. Nesses casos, é mais recomendado utilizar um ensaio de piezocone (CPTU) ou um ensaio sísmico (SCPT/SCPTU) para a investigação geotécnica.

Quadro 2 – Aplicabilidade e uso de ensaios *in situ*

Grupo	Equipamento	Tipo de solo	Perfil	Parâmetros											
				u	ϕ'	S_u	D_r	m_v	c_v	K_0	G_0	σ_h	OCR	$\sigma-\epsilon$	
Penetrômetro	Dinâmicos	C	B	-	C	C	C	-	-	-	C	-	C	-	
	Mecânicos	B	A/B	-	C	C	B	C	-	-	C	C	C	-	
	Elétricos (CPT)	B	A	-	C	B	A/B	C	-	-	B	B/C	B	-	
	Piezocone (CPTU)	A	A	A	B	B	A/B	B	A/B	B	B	B/C	B	C	
	Sísmicos (SCPT/SCPTU)	A	A	A	B	A/B	A/B	B	A/B	B	A	B	B	B	
	Dilatômetro (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B	C	
	Standard Penetration Test (SPT)	A	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	C	-	
	Resistividade	B	B	-	B	C	A	C	-	-	-	-	-	-	
Pressiômetro	Pré-furo (PBP)	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C	C	
	Autoperfurante (SBP)	B	B	A	B	B	B	B	A	B	A	A/B	B	A/B	
	Cone-pressiômetro (FDP)	B	B	-	C	B	C	C	C	-	A	C	C	C	
Outros	Palheta	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	-	B/C	B	
	Ensaio de placa	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	
	Placa helicoidal	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	-	
	Permeabilidade	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-	
	Ruptura hidráulica	-	-	B	-	-	-	-	C	C	-	B	-	-	
	Sísmicos	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	B	-	

Aplicabilidade: A = alta; B = moderada; C = baixa; - = inexistente

Definição de parâmetros: u = poropressão *in situ*; ϕ' = ângulo de atrito efetivo; S_u = resistência ao cisalhamento não drenada; D_r = densidade relativa; m_v = módulo de variação volumétrica; c_v = coeficiente de consolidação; K_0 = coeficiente de empuxo no repouso; G_0 = módulo cisalhante a pequenas deformações; σ_h = tensão horizontal; OCR = razão de pré-adensamento; $\sigma-\epsilon$ = relação tensão-deformação.

Fonte: SCHNAID, ODEBRECHT; 2012.

3.2 INVESTIGAÇÕES DIRETAS

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), métodos diretos são definidos como de natureza empírica ou semiempírica, têm fundamentação estatística, a partir da qual as medidas de ensaio são correlacionadas diretamente ao desempenho de obras geotécnicas. Nesse sentido, o SPT constitui o método mais conhecido de investigação direta, sendo aplicado tanto na estimativa de recalques quanto no cálculo da capacidade de carga de fundações.

A NBR 6484/2020 – Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, descreve o procedimento do ensaio SPT, que consiste na cravação do amostrador no fundo de uma escavação, que pode ou não ser revestida, por meio da queda de um peso de 65kg a uma altura de 75cm. A perfuração é feita por tradagem e circulação de água, utilizando um trépano de lavagem como ferramenta de escavação. A perfuração é feita de metro em metro, onde o valor de N_{SPT} será o número de golpes necessários para fazer o amostrador penetrar 30cm após uma cravação de 15cm. Para o projeto de qualquer edificação, a norma brasileira

NBR 6122/2019 – Projeto e Execução de Fundações, exige no mínimo uma investigação preliminar por sondagens a percussão (SPT).

A depender da necessidade, essa mesma norma também recomenda a utilização de outros tipos de sondagens, como sondagens mistas e rotativas no caso de dúvidas quanto à natureza do material impenetrável à percussão, ou ensaio de cone (CPT) que permite medir a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral da parede cilíndrica do cone com o solo (f_s) (ROCHA; GIACHETI, 2017).

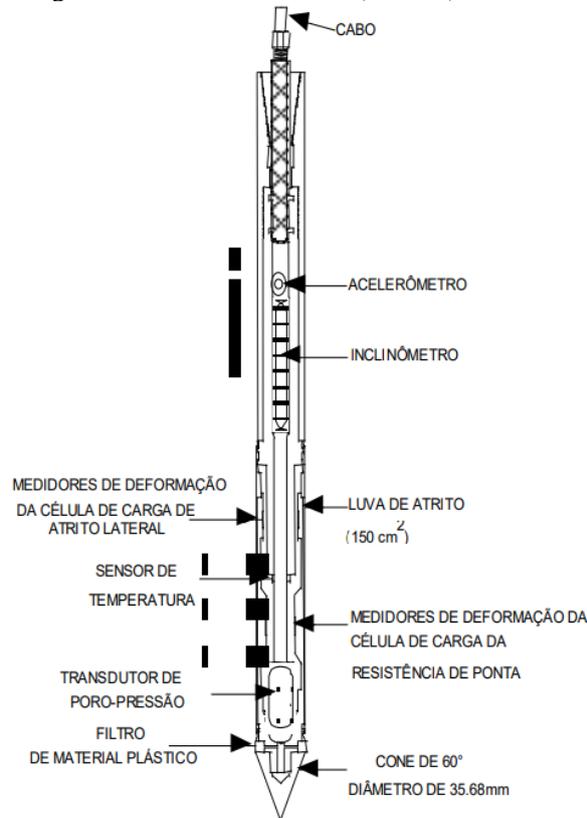
O ensaio de cone e piezocone, conhecidos pelas siglas CPT (*cone penetration test*) e CPTU (*piezocone penetration test*), respectivamente, caracterizam-se como uma das mais importantes ferramentas de prospecção geotécnica. Os resultados de ensaios podem ser utilizados para a determinação estratigráfica do perfil do solo, a determinação de propriedades dos materiais analisados, principalmente em depósitos de argilas moles, e a previsão da capacidade de carga de fundações (SCHNAID, ODEBRECHT, 2012).

Uma variação do CPT bastante difundida é o ensaio de piezocone (CPTu), que permite obter a medida da poropressão gerada durante o processo de cravação do cone amostrador, e eventualmente sua dissipação, sendo indicado em depósitos de argilas moles e areias sedimentares. A Figura 3 ilustra a ponteira utilizada no ensaio, onde existe um sensor para a medida de poropressão, além de transdutores sísmicos, caracterizando um piezocone sísmico ou SCPTU (*Seismic Cone Penetration Test*) (SOUZA, 2011).

Além do CPTu, o ensaio de cone também apresenta outras variações, nas quais pode ser utilizado na caracterização do solo para determinação do estado de tensões *in situ* (K_0), ângulo de atrito efetivo (Φ'), módulo cisalhante ($G_{máx}$), história de tensões e coeficiente de adensamento (SCHNAID, ODEBRECHT; 2012).

Autores como Souza (2011) e Mayne (2000) destacam o fato de que o ensaio CPT apresenta vantagens por ser um ensaio mais rápido, mais prático, confiável e com a possibilidade de trabalhar com sensores adicionais para a aferição de outros parâmetros, como por exemplo o piezocone, cone óptico, cone pressiométrico, cone resistivo e o cone sísmico, caracterizando assim ensaios híbridos em que se utilizam de métodos geotécnicos e geofísicos.

Figura 3 – Piezocone Sísmico (SCPTU)



Fonte: SOUZA; 2011.

3.3 MÉTODOS GEOFÍSICOS

Os métodos geofísicos têm sido cada vez mais usados nas últimas décadas como parte das investigações geotécnicas, seja para projetos de engenharia ou mesmo para prospecção de bens minerais e em estudos ambientais. Segundo Orellana (1972) a geofísica é a ciência que estuda as estruturas do interior da Terra e a localização de determinados materiais delimitados pelo contraste de alguma de suas propriedades físicas com as do meio circundante (*apud* Souza e Gandolfo, 2012).

Nesse sentido Fonseca (2008), classifica os métodos geofísicos correntes em:

- a) Sísmicos: utilizam ondas P e/ou S de superfície ou convencionais em profundidade e tomografia de refração/reflexão. Exemplos: SASW (*Seismic Analysis of Surface Waves*, Análise Sísmica de Ondas de Superfície), MASW (*Multistation Analysis of Surface Wave*, Análise em Multi-estações de Ondas de Superfície), métodos entre furos ou entre furos e a superfície (*Down-hole*, *Up-hole*, *Cross-hole*, VSP, *PS-logging*);

- b) Elétricos: podem ser de superfície (1D de perfil; 1D de impacto; 2D e 3D de imagens) e em furos de sondagem (1D de perfil; 2D e 3D de imagens);
- c) Eletromagnéticos: podem ser realizados na superfície (GPR, UFL) e entre de ou para furos (GPR);
- d) Técnicas mistas (geotécnicas e geofísicas): SCPTu, RTCPT (CPT com fonte sísmica para registro tomográfico) ou SDMT.

Devido à variabilidade de técnicas, neste trabalho será dado destaque apenas aos métodos sísmicos.

3.3.1 Métodos Sísmicos

Para estes métodos, Godlewski e Szczepanski (2015, tradução nossa) os classificam em três tipos:

- a) por meio de ondas de superfície, aos quais cita MASW, SASW e CSWS (*Continuous Surface Wave System*, Sistema de Ondas de Superfície Contínua);
- b) por meio de furos de sondagem em que se utiliza técnicas *down-hole*, *up-hole* ou *cross-hole*;
- c) por meio de sondagens, como a sísmica CPT ou a sísmica DMT.

De acordo com Poulos (2021, tradução nossa), tradicionalmente eram utilizados apenas ensaios geofísicos envolvendo ondas P (compressão), no entanto, para solos saturados as leituras para esse tipo de onda são comprometidas pela presença da água no solo, já que a velocidade da onda em solos assim será praticamente a mesma da onda quando percorre a água (cerca de 1500 m/s), logo, não é possível realizar a distinção dos solos baseados nesse tipo de onda. Assim, para solos e rochas pouco rígidas, esse mesmo autor sugere a utilização de ondas S (cisalhante).

Nas ondas do tipo P, o movimento das partículas no meio é paralelo à sua direção de propagação. Já nas ondas S, o movimento das partículas é perpendicular à direção da onda, e são caracterizadas por um aumento da amplitude do sinal, bem como pelo fato de polarizar: invertendo a direção do golpe, todas as fases correspondentes às ondas de cisalhamento aparecem invertidas (SANTOS *et al*, 2018).

As medições envolvendo a velocidade de onda cisalhante (V_s) têm uma vantagem em relação às medições realizadas em laboratório, pois elas permitem identificar aspectos geológicos como junções, falhas e intemperismos que são refletidos como uma redução de V_s

e que não são identificados em valores obtidos através de uma amostra ou massa homogênea (POULOS, 2021 tradução nossa). A Tabela 1 apresenta intervalos de velocidade de onda cisalhante para diferentes tipos de materiais.

Assim, Poulos (2021, tradução nossa) ressalta que algumas correções que eram feitas em parâmetros obtidos em ensaios de laboratório não são mais necessárias quando os parâmetros de projeto são determinados por ensaios *in situ* utilizando V_s .

Tabela 1 – Valores típicos de V_s para geomateriais

Material	Velocidade de Onda Cisalhante V_s (m/s)
Solo muito mole	85-105
Solo mole	106-135
Solo médio	136-185
Solo rígido	186-275
Solo muito rígido	276-365
Rochas moles/ Solo cimentado	366-760
Rochas	761-1500
Rochas duras	>1500
Concreto	2286-2438

Fonte: POULOS, 2021.

Dentre as desvantagens da utilização desses métodos, pode-se destacar os altos preços dos equipamentos, que por serem geralmente importados implica em investimentos de dezenas ou centenas de milhares de dólares, bem como a necessidade de uma mão de obra especializada para a aquisição dos dados e a manutenção dos equipamentos (SOUZA, GANDOLFO; 2012).

De acordo com Dourado (1984, *apud* SOUZA e GANDOLFO, 2012), o conhecimento dos valores das velocidades de onda V_P e V_S juntamente com a densidade dos materiais permite a determinação de parâmetros elásticos dinâmicos dos maciços como o módulo de Young (E), o coeficiente de Poisson (ν) e o módulo de rigidez ou cisalhamento (G_0). Outro parâmetro importante que pode ser obtido a partir da V_s é a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), como apresentado por Poulos (2021). Segundo Souza e Gandolfo (2012), o conhecimento desses parâmetros é importante para a previsão do comportamento tensão-deformação de solos sob solitação dinâmica de baixas amplitudes, sobre os quais serão instaladas estruturas que causem algum tipo de vibração como máquinas ou motores vibratórios, aerogeradores de energia eólica etc.

A respeito da aplicabilidade dos métodos geofísicos, Fernández (2017) apresenta a tabela onde apresenta os métodos e suas eficiências na determinação de alguns parâmetros, além de comentários sobre a aplicação de cada método

Quadro 3 – Ensaios para a determinação das propriedades dinâmicas dos solos

Ensaio/Técnica	Aplicabilidade									Comentários
	Tipo de Solo	Pequenas Distorções ($\gamma < 10^{-4}$)				Médias Distorções (10^{-4} a 10^{-3})		Grandes distorções ($\gamma > 10^{-2}$)		
		V_s, G_1	V_p	$G, G/G_0$	ξ	$G, G/G_0$	ξ	Prop. Dinâmicas	Prop. Resistência	
Ensaios de Campo										
Campanhas e ensaios geotécnicos convencionais										Praticado em todo mundo
Sondagem; amostras	A	-	-	-	-	-	-	-	-	Grande base de dados
SPT	B	B	B-C	-	-	-	-	-	B	normalização
CPT:CPTU	B-A	C-B	C-B	-	-	-	-	-	B	determinação indireta das propriedades dinâmicas
Pressiometro	B-A	C	C	-	-	-	-	-	B	
Ensaios sísmicos em furo e ensaios dinâmicos										Custo elevado
<i>crosshole</i>	B	A-B	B	-	C-B	-	-	-	-	normalização
<i>downhole/uphole</i>	C	B-A	B	-	C-B	-	-	-	-	resultados rigorosos
<i>SCPT/SCPTU</i>	B	A-B	B	-	C-B	-	-	-	-	
<i>SBPMT</i>	A	B	B	B	B	C-B	C-B	-	C-B	
Geofísica de Superfície										Difícil de interpretar
Refração	B-C	B-C	B-C	-	-	-	-	-	-	Processamento elevado
Reflexão	C	C	B	-	-	-	-	-	-	Limitações de profundidade
SWM	B-C	B-A	B	-	B	-	-	-	-	Baixo custo/boas perspectivas
Resistividade	C	-	-	-	-	-	-	-	-	
Outros métodos sísmicos										Desenvolvimentos recente
Análise de ruído	-	C	C	-	C	-	-	-	-	Sem normalização
Sismos fracos	-	C	C	-	C	-	-	-	-	
Sismos forte	-	B	B	B	B-C	B-C	B-C	B-C	B-C	
Ensaios de Laboratório										
Geotecnia convencional	A	-	-	-	-	-	-	-	-	Amostragem; preparação de
<i>Bender elements</i>	A	A-B	A-B	-	-	-	-	-	-	amostras; perturbação
Coluna ressonante	A	A-B	A-B	A	A	-	-	-	-	Custo elevado; normalização
Torção cíclica	A	B-A	B-A	A	A	A	A	A	A	Bom para distorções médias a
Triaxial cíclico	A	B	B	A	A	A	A	A	A	elevadas; CR com bons resultados
Corte simples	A	B-A	B-A	A	A	A	A	A	A	a baixas distorções
Ensaios em modelo										
Mesa sísmica	-	v	v	v	v	v	v	v	v	Custo elevado, sem normalização
Centrifugadora	-	v	v	v	v	v	v	v	v	<i>Pouco frequente</i>
	Determinação indireta		Aplicabilidade: A - elevada; B - Moderada; C - baixa; v - determinação das propriedades dos solos excelentes. Poucos medições. Classificação ainda impossível.							

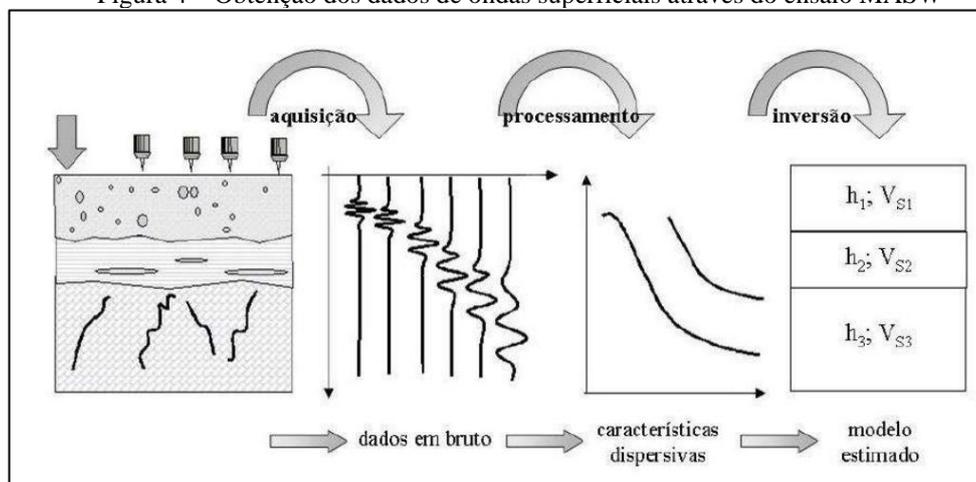
Fonte: PITILAKIS, ANASTASIADIS, 1998 *apud* FERNÁNDEZ, 2017

3.3.2 MASW

A técnica MASW (*Multistation Analysis os Surface Waves*) é um método não invasivo e não destrutivo, baseado na característica dispersiva da propagação das ondas superficiais em meios estratificados, obtendo a velocidade de propagação da onda S indiretamente a partir da velocidade de propagação da onda Rayleigh (APAZA e BARROS, 2010 *apud* FERNÁNDEZ, 2017). Para que a obtenção do perfil do solo seja mais fácil e rápida, utilizam-se múltiplos geofones, geralmente entre 24 e 48 canais.

A metodologia do ensaio, como apresentado por Fernández (2017), consiste em uma perturbação na superfície a partir de uma fonte impulsiva e registro das ondas superficiais em sismogramas. Em seguida, ocorre o processamento dos dados para a elaboração das curvas de dispersão de velocidade de fase de grupo e frequência. Por fim, ocorre a inversão dos dados por meio de um modelo estimado produzindo respostas sobre as propriedades das camadas, como espessura, densidade e V_s . A Figura 4 ilustra o processo de obtenção dos dados a partir desse ensaio.

Figura 4 – Obtenção dos dados de ondas superficiais através do ensaio MASW



Fonte: STROBBIA, 2003 *apud* FERNÁNDEZ, 2017

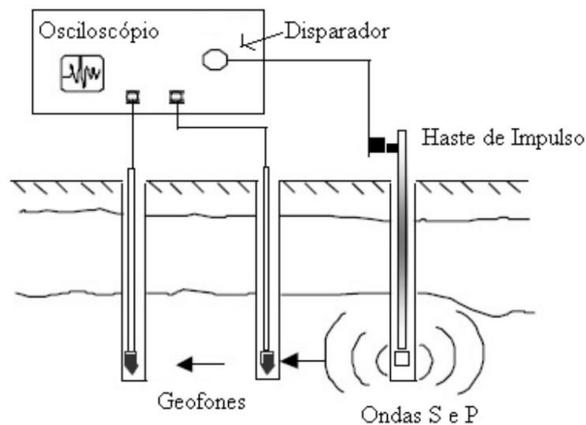
3.3.3 Ensaios Down-hole e Cross-hole

Os ensaios *Down-hole* e *Cross-hole* são ensaios realizados utilizando furos de sondagem, que podem ser pré-existentes (utilizados em sondagens SPT, por exemplo) ou não. São ensaios que aplicam níveis baixos de deformação do solo, com amplitudes de deformação cisalhante inferiores a 0,001% (SOUZA, 2011). De acordo com Barros (1997), o nível de

deformação permite determinar o módulo de cisalhamento máximo (G_{\max}) (apud SOUZA, 2011).

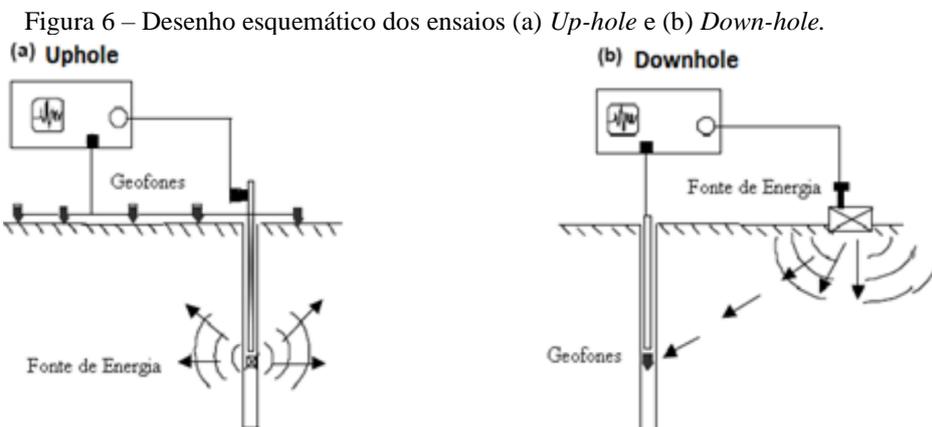
No ensaio *Cross-hole* são utilizados no mínimo dois furos de sondagem onde são posicionados os geofones, e consiste em medir a velocidade de propagação da onda entre o interior desses furos. A Figura 5 ilustra o ensaio.

Figura 5 – Desenho esquemático de um ensaio *Cross-hole*.



Fonte: LUNA e JADI, 2000 apud SOUZA, 2011.

Já o ensaio *Down-hole* e *Up-hole* são ensaios alternativos para a determinação da velocidade de propagação da onda em comparação com o *Cross-hole*. Nesses ensaios são necessários apenas um furo de sondagem, e se diferenciam entre si pela posição da fonte geradora e do receptor sísmico. No ensaio *Down-hole* o dispositivo receptor é posicionado em diferentes profundidades e a fonte geradora de ondas sísmicas é mantida na superfície. Já no ensaio *Up-hole*, os geofones são mantidos na superfície e o dispositivo emissor de ondas é posicionado em diferentes profundidades no furo de sondagem. A Figura 6 ilustra esses dois ensaios.



Fonte: LUNA e JADI, 2000 apud SOUZA, 2011.

3.4 CORRELAÇÕES ENTRE MÉTODOS GEOFÍSICOS E MÉTODOS CONVENCIONAIS

Na literatura é possível encontrar correlações que permitem obter esses parâmetros a partir das ondas V_S , bem como correlações com parâmetros obtidos pelos métodos convencionais de sondagem como N_{SPT} e o CPT.

3.4.1 Correlações entre V_S e N_{SPT}

Uma quantidade significativa de correlações pode ser encontrada na literatura envolvendo V_S e o N_{SPT} . Uma das mais óbvias, mas provavelmente a que possui a maior variabilidade é a citada por Poulos (2021):

$$V_S = A \cdot N^B \quad (1)$$

Onde N é o valor medido pelo SPT, e A e B são parâmetros empíricos, cujos valores variam de acordo com os autores. São apresentados no Quadro 4. É possível notar uma grande variabilidade nos coeficientes dessas correlações. Pode-se afirmar que essa variação se deve à variabilidade das condições geotécnicas, bem como dos diferentes métodos e equipamentos usados nas investigações (FATEHNIA *et al*, 2015 tradução nossa).

É possível obter um comparativo entre os valores de N estimados por meio das correlações com N medido no ensaio SPT através da consistência do solo encontrado na sondagem, como mostra o Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos Solos segundo a NBR 6484/2020

Solo	Índice de Resistência à Penetração	Designação
Areia e Silte Arenoso	≤ 4	Fofa (o)
	5 – 8	Pouco compacta (o)
	9 – 18	Medianamente compacta (o)
	19 – 40	Compacta (o)
	> 40	Muito compacta (o)
Argila e Silte Argiloso	≤ 2	Muito mole
	3 – 5	Mole
	6 – 10	Média (o)
	11 – 19	Rija (o)
	20 – 30	Muito rija (o)
	> 30	Dura (o)

Fonte: ABNT (2020)

Quadro 4 – Correlações propostas entre N_{spt} e V_s

Autor(es)	Tipo de solo	Correlações entre N_{spt} e V_s (m/s)
Kanai (1966)	Todos os solos	$V_s = 19 \cdot N^{0,6}$
Imai e Yoshimura (1970)	Todos os solos	$V_s = 76 \cdot N^{0,39}$
Shibata (1970)	Areias	$V_s = 32 \cdot N^{0,50}$
Ohta <i>et al</i> (1972)	Areias	$V_s = 87 \cdot N^{0,36}$
Fujiwara (1972)	Todos os solos	$V_s = 92,1 \cdot N^{0,337}$
Ohsaki e Iwasaki (1973)	Todos os solos	$V_s = 82 \cdot N^{0,39}$
	Solos não coesivos	$V_s = 59 \cdot N^{0,47}$
Imai <i>et al</i> (1975)	Todos os solos	$V_s = 90 \cdot N^{0,34}$
Imai (1977)	Todos os solos	$V_s = 92,1 \cdot N^{0,337}$
	Areias	$V_s = 80,6 \cdot N^{0,331}$
	Argilas	$V_s = 102 \cdot N^{0,292}$
Fialho Rodrigues (1979)	Todos os solos	$V_s = 81,39 \cdot N^{0,34}$
JRA (1980)	Argilas	$V_s = 100 \cdot N^{0,33}$
	Areias	$V_s = 80 \cdot N^{0,33}$
Seed e Idriss (1981)	Todos os solos	$V_s = 61 \cdot N^{0,50}$
Imai e Tonouchi (1982)	Todos os solos	$V_s = 97 \cdot N^{0,314}$
Seed <i>et al</i> (1983)	Graduação grossa	$V_s = 56 \cdot N^{0,5}$
Lee (1990 <i>in</i> Madiai, 1999)	Argila	$V_s = 114 \cdot N^{0,31}$
	Silte	$V_s = 105,6 \cdot N^{0,32}$
	Areias	$V_s = 57 \cdot N^{0,49}$
Yokota <i>et al</i> (1991)	Todos os solos	$V_s = 121 \cdot N^{0,27}$
Kalteziotis <i>et al</i> (1992)	Todos os solos	$V_s = 76,2 \cdot N^{0,24}$
	Solos coesivos	$V_s = 76,6 \cdot N^{0,45}$
	Solos não coesivos	$V_s = 49,1 \cdot N^{0,50}$
Athanasopoulos (1995)	Todos os solos	$V_s = 107,6 \cdot N^{0,36}$
Iyisan (1996)	Todos os solos	$V_s = 51,5 \cdot N^{0,516}$
Maugeri e Carruba (1997)	Argila sobre consolidada	$V_s = 48 \cdot N^{0,55}$
Jafari <i>et al</i> (1997)	Todos os solos	$V_s = 22 \cdot N^{0,85}$
Imai (1997 <i>in</i> Ansal <i>et al.</i> 2003)	Todos os solos	$V_s = 91 \cdot N^{0,337}$
Kiku <i>et al</i> (2001)	Todos os solos	$V_s = 68,2 \cdot N^{0,292}$
Jafari <i>et al</i> (2002)	Argilas	$V_s = 27 \cdot N^{0,73}$
	Siltos	$V_s = 22 \cdot N^{0,77}$
Anbazhagan e Sitharam (2006)	Todos os solos	$V_s = 50 \cdot (N_{60})^{0,41}$
Hasancebi e Ulusay (2006)	Todos os solos	$V_s = 90 \cdot N^{0,309}$
	Areias	$V_s = 90,82 \cdot N^{0,319}$
	Argilas	$V_s = 97,89 \cdot N^{0,269}$
Maheshwari <i>et al</i> (2008)	Todos os solos	$V_s = 95,64 \cdot N^{0,301}$
Dikmen (2009)	Todos os solos	$V_s = 58 \cdot N^{0,39}$
	Areias	$V_s = 73 \cdot N^{0,33}$
	Siltos	$V_s = 58 \cdot N^{0,36}$
	Argilas	$V_s = 58 \cdot N^{0,48}$
Fatehnia <i>et al</i> (2015)	Solos coesivos	$V_s = 77,1 \cdot N^{0,355}$

Fonte: HANUMANTHARAO e RAMANA, 2008; FATEHNIA *et al*, 2015; FERNÁNDEZ, 2017; POULOS, 2021.

3.4.2 Correlações entre G_0 e V_s

A determinação do módulo cisalhante (G_0) é feita através da teoria da elasticidade, ao medir os tempos de chegada da onda de cisalhamento em sensores posicionados a uma determinada profundidade no solo e em seguida calculando a velocidade do percurso da onda entre os dois sensores (SCHNAID, ODEBRECHT; 2012). Nesse sentido, como aponta Fonseca (2008), é com base em conceitos elásticos da teoria de onda que se tem a simples relação entre a velocidade de ondas sísmicas de corte, de pouca amplitude, e o módulo de deformação cisalhante:

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (2)$$

Onde ρ é a massa específica em kN/m^3 .

Souza (2011), ressalta que o valor do módulo de cisalhamento pode ser influenciado por diversos fatores, como apontam os estudos de Giacheti (2001), Hardin e Drnevich (1972). A Tabela 3 apresenta essa diversidade de fatores que afetam o módulo de cisalhamento dos solos, que são divididos em três categorias: muito importantes (V), de menor importância (L), e relativamente sem importância (U e R).

Tabela 3 – Fatores que afetam o módulo de cisalhamento em solos arenosos e coesivos

Fatores	Material	
	Areias Limpas	Solos Coesivos
Amplitude de deformação	V	V
Tensão normal efetiva octaédrica	V	V
Índice de vazios	V	V
Nº de ciclos de carregamento	R	R
Grau de saturação	R	V
Razão de sobreadensamento	R	L
Envoltória de resistência efetiva	L	L
Tensão cisalhante octaédrica	L	L
Frequência de vibração (> 0,1 Hz)	R	R
Efeitos do tempo	R	L
Características dos grãos	R	R
Estrutura do solo	R	R
Variação do volume devido a deformação cisalhante	U	R

Fonte: HARDIN e DRNEVICH, 1972 *apud* SOUZA, 2011.

3.4.3 Correlações entre S_u e V_s

Assim como no CPTU, correlações entre a velocidade das ondas de cisalhamento e resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) para argilas pode ser determinada, uma vez que ambas dependem de parâmetros em comum (L'HEUREUX, LONG; 2016, tradução nossa). Assim, L'Heureux e Long (2016) apresentam a seguinte correlação entre esses parâmetros:

$$S_u = 0,02 \cdot V_S^{1,45} \quad (3)$$

Outra correlação também é apresentada por Agaiby e Mayne (2015, *apud* POULOS, 2021), como se pode ver na Equação (9):

$$S_u = 0,152 \cdot V_S^{1,142} \quad (4)$$

Onde em ambas equações, V_S é dada em m/s e S_u em kPa.

O Quadro 5 apresenta uma relação entre a resistência ao cisalhamento não drenada e a consistência do solo, bem como com o valor de N_{SPT} .

Quadro 5 – Propriedades comuns de solos argilosos

Consistência	$N_{SPT,60}$	Identificação manual	S_u (kPa)
Dura	>30	Marca-se dificilmente	> 200
Muito rijá	15 a 30	Marca-se com a unha do polegar	100 a 200
Rijá	8 a 15	Marca-se com o polegar	50 a 100
Média	4 a 8	Moldável sob pressões fortes	25 a 100
Mole	2 a 4	Moldável sob pressões fracas	12,5 a 25
Muito mole	< 2	Desfaz entre os dedos	0 a 12,5

Fonte: HUNT (1984).

3.4.4 Correlações entre v e V_S

O módulo de Poisson (ν) do solo pode ser obtido através da seguinte correlação apresentada por Fernandez (2017):

$$\nu = \frac{k - 2}{2k - 2} \quad (5)$$

Em que $k = (V_P / V_S)^2$. Sendo V_P a velocidade da onda P ou de compressão.

A partir do valor de ν , é possível determinar o caráter do solo, de acordo com o Quadro 6.

Quadro 6 – Tipos de solos e sua correlação com o Módulo de Poisson

Solo	ν
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,3 a 0,5
Argila saturada	0,4 a 0,5
Argila não saturada	0,1 a 0,3

Fonte: TEIXEIRA E GODOY (1996, *apud* FERNÁNDEZ, 2017).

3.4.5 Correlações entre E e V_s

O Módulo de Young, ou Módulo de Deformabilidade (E) pode ser obtido através do módulo de Poisson (ν) e do módulo de cisalhamento (G_0) como mostra a seguinte fórmula da Teoria da Elasticidade:

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G_0 \quad (6)$$

Como já apresentado, esses parâmetros podem ser obtidos através do V_s , com o G_0 dado em MPa e ν adimensional, obtendo o valor de E em MPa. Assim, temos que E também pode ser obtido diretamente através de V_P e V_S , além do peso específico (ρ em kg/cm³), como se pode constatar pela equação apresentada por Duarte (1997 *apud* FERNANDEZ, 2017):

$$E = \rho \cdot V_S^2 \cdot \left(\frac{3 V_P^2 - 2 V_S^2}{V_P^2 - V_S^2 / 3} \right) \quad (7)$$

Marangón (2018), apresenta o Quadro 7 com intervalos do valor de E para argilas saturadas na condição não drenada.

Quadro 7 - Valores para o módulo de deformabilidade em argilas saturadas

Consistência	Módulo de Deformabilidade (MPa)
Muito mole	< 2,5
Mole	2,5 a 5
Consistência média	5 a 10
Rija	10 a 20
Muito rija	20 a 40
Dura	> 40

Fonte: MARANGON (2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será delineada a metodologia seguida para a realização deste estudo, bem como a descrição dos estudos de caso que foram a base desta pesquisa.

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A primeira etapa deste trabalho consistiu em uma pesquisa bibliográfica sobre os métodos geofísicos e suas principais vantagens com relação a aplicação e obtenção de resultados. Assim, em virtude da variabilidade entre os métodos, foi dada ênfase nos métodos sísmicos, que trabalham com a leitura da velocidade das ondas P e S, com destaque para este segundo tipo de onda.

Em seguida, buscou-se na literatura estudos que apresentassem correlações entre o valor de V_S e parâmetros obtidos nos métodos de investigação convencionais, como o N_{SPT} e o CPT, bem como parâmetros obtidos em ensaios de laboratório como G_0 , S_u , ν e E . Estas deveriam indicar além da relação entre os parâmetros, também o tipo de solo ao qual a sua utilização é indicada, permitindo assim uma interpretação mais confiável.

De posse dessas correlações, buscou-se então por estudos de caso em que foram realizados ensaios geofísicos e ensaios convencionais na caracterização do solo, onde o método geofísico deveria se basear na velocidade de onda cisalhante (V_S). Para este trabalho, foram selecionados estudos de caso em que os dados coletados fossem apresentados de forma numérica e não somente em forma gráfica, para que as informações pudessem ser extraídas com mais precisão, pois segundo Rodrigues *et al* (2006), um erro na interpretação de V_S resulta em um erro duas vezes maior no valor de G_0 , um dos parâmetros a serem analisados.

Assim, foram buscados trabalhos em bancos de teses e dissertações, bem como por meio do contato direto com os pesquisadores para obter dados que pudessem ser utilizados neste trabalho. Então, foram selecionados três estudos envolvendo investigações geofísicas e ensaios SPT e CPT, que correspondem aos estudos de Fernandez (2017) e Briaud e Gibbens (1994) em que foram utilizadas sondagens SPT, e o estudo de Souza (2011) que utilizou o ensaio de cone sísmico (SCPT).

O trabalho de Fernández (2017) consiste em dois perfis geológico-geotécnicos realizados nas quadras 215 Sul e 115 Sul, localizados na Asa Sul de Brasília-DF. Nesse estudo, o autor realizou uma caracterização do solo por meio do ensaio MASW, e então fez uma

integração dos parâmetros obtidos a partir dos valores de V_S encontrados nesse ensaio com as sondagens SPT que já haviam sido feitas nesse local.

O trabalho de Briaud e Gibbens (1994) consistiu em um estudo de caso em um campo experimental no estado do Texas – EUA, onde foram realizados ensaios de cisalhamento em furos de sondagem (do inglês *borehole shear test*), ensaio *cross-hole*, CPT, dilatômetro, pressurômetro, ensaio de palheta e SPT. Para este trabalho, foram utilizados os resultados do ensaio *Cross-hole* e a sondagem SPT realizados nesse campo.

Já o trabalho de Souza (2011) tratou da análise da aplicação de um método para a previsão da curva tensão-recalque, utilizando ensaios de cone sísmico além de ensaios *cross-hole* e *down-hole*. Foram estudados dois locais, sendo eles o campo experimental de fundações da EESC/USP – São Carlos e da UNESP-Bauru. Para este trabalho, serão utilizados os dados obtidos no campo experimental de São Carlos.

Os trabalhos foram escolhidos devido ao fato de apresentarem os valores de V_S por meio das sondagens geofísicas, bem como os resultados das sondagens SPT e CPT, permitindo assim aplicar as correlações encontradas na literatura.

Com base nos dados de V_S desses trabalhos, foram utilizadas as correlações anteriormente apresentadas para se obter os valores do N_{SPT} estimados (N_E). Foi calculado o valor do N_E médio entre as correlações que se aplicam para todos os tipos de solos, bem como as que se aplicam apenas para solos argilosos e siltosos para o estudo da Asa Sul de Brasília e as que se aplicam para solos arenosos para o caso do campo experimental do Texas. Além do valor médio, foi calculado o desvio padrão para cada tipo de correlação. Por fim, foi calculada uma média entre os valores de todas as correlações que foram utilizadas, bem como o respectivo desvio padrão.

Além disso, para o estudo de Fernández (2017) e Souza (2011), foram estimados os valores do módulo de cisalhamento (G_0), resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), módulo de poisson (ν) e o módulo de deformabilidade (E) a partir do valor da velocidade de onda cisalhante e onda de compressão (V_P). No caso do estudo de Briaud e Gibbens (1994), este será utilizado apenas para a aplicação das correlações entre V_S e N_{SPT} , para analisar, para verificar a acurácia delas em um solo arenoso.

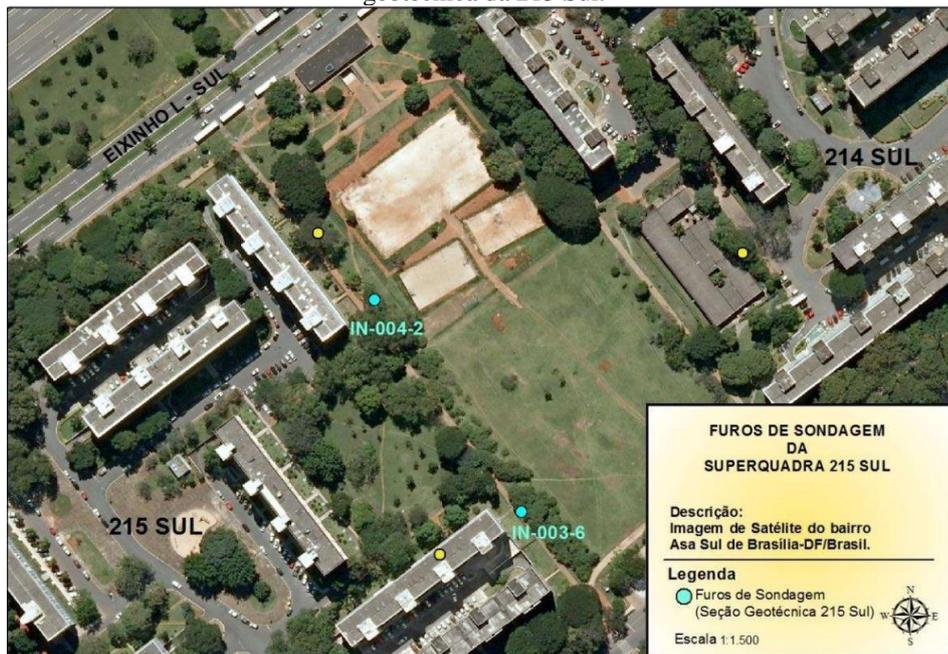
Por fim, os parâmetros estimados por meio das correlações foram comparados com os parâmetros encontrados através do ensaio SPT e com os valores de referência correspondentes ao tipo de solo encontrado nas sondagens.

A seguir, serão caracterizados os estudos de caso, bem como os dados que serão utilizados para este trabalho.

4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DA ASA SUL DE BRASÍLIA

O estudo realizado por Fernandez (2017) consistiu na realização de sondagens sísmicas por meio do MASW (*Multistation Analysis of Surface Wave*, Análise em Multi-estações de Ondas de Superfície), realizadas na Asa-Sul de Brasília. O autor definiu dois perfis principais onde foram locados pontos de sondagem geofísica de forma que se pudesse ter uma boa comparação com os perfis de sondagem que já haviam sido realizados na área. Os perfis definidos correspondem às quadras 215 Sul e 115 Sul, como mostram a Figura 7 e a Figura 8, indicando o local onde foram realizadas as sondagens SPT por Oliveira (1996, *apud* FERNÁNDEZ, 2017)).

Figura 7 – Croqui com localização dos furos de sondagem utilizados para construção da seção geológico-geotécnica da 215 Sul.



Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

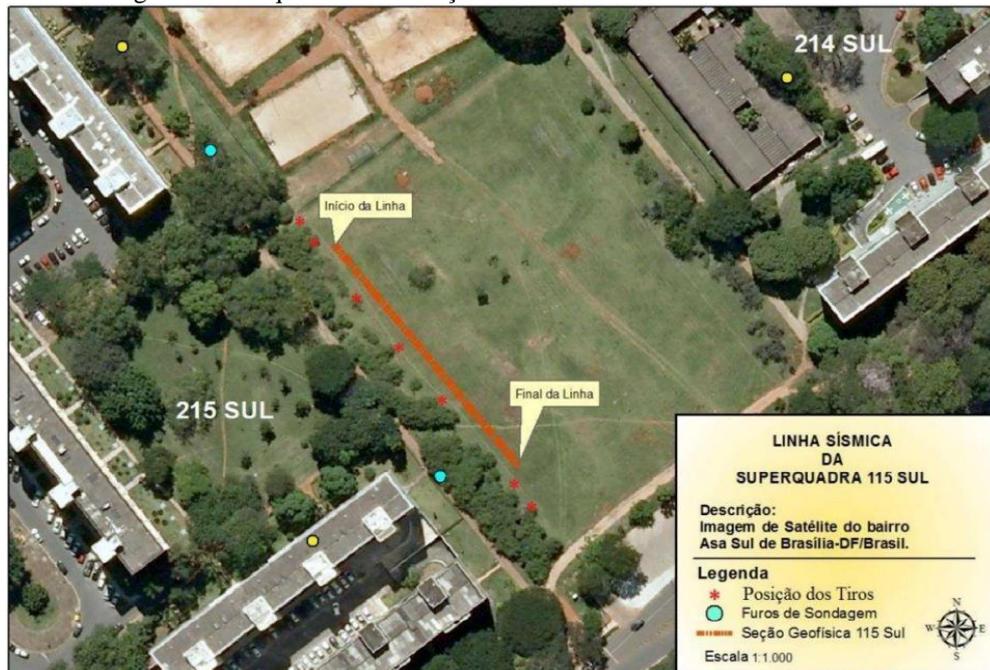
Figura 8 - Croqui com localização dos furos de sondagem utilizados para construção da seção geológico-geotécnica da 115 Sul



Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

O autor então realizou sondagens utilizando métodos geofísicos nessa área de forma a gerar um novo perfil geológico-geotécnico a partir da integração de parâmetros obtidos por meio da geofísica e do ensaio SPT. A locação dos furos de sondagem utilizando a sísmica é mostrada na Figura 9 e na Figura 10.

Figura 9 – Croqui com localização da linha sísmica realizada na 215 Sul.



Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

Figura 10 - Croqui com localização da linha sísmica realizada na 115 Sul.



Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

O método para a análise dos dados, bem como a metodologia para a calibração dos equipamentos e uma caracterização geológica mais aprofundada para a região de estudo podem ser encontradas em (FERNÁNDEZ, 2017).

4.2.1 Sondagem SPT

Dentre os estudos de caso abordados nesse trabalho, não foi possível obter os relatórios de sondagem SPT do trabalho de Fernández (2017). Logo, foram utilizados a título de comparação, os intervalos de valores de N_{SPT} definidas pelo autor para as sondagens utilizadas em sua pesquisa. Como apresentado nas Figura 7 e Figura 8, o autor escolheu 5 perfis de sondagem SPT, sendo 3 na Seção 115 Sul e 2 na Seção 215 Sul, como mostram o Quadro 8 e o Quadro 9.

Quadro 8 – Resultados das sondagens SPT na Seção 115 Sul

Furo	SD-007-2		SD-007-3		SD-007-4	
Coord. x	186918		186897		186893	
Coord. y	8247805		8247813		8247838	
Data	13/03/1973		14/03/1974		13/03/1974	
Cota	1069		1069		1069	
Prof. Total	-13,45		-11,45		-13,45	
NA	NE		NE		-12,45	
Prof. (m)	Nspt	Descrição da camada	Nspt	Descrição da camada	Nspt	Descrição da camada
1	4	Argila siltosa Vermelha	4	Argila siltosa Vermelha	4	Argila siltosa Vermelha
2						
3						
4						
5						
6	5 a 15	Argila siltosa c/ concr. laterítica	5 a 15	Argila siltosa com concreção laterítica	5 a 15	Argila siltosa com concreção laterítica
7						
8	5 a 15	Argila siltosa c/ concr. laterítica	>15	Silte Argiloso Vermelho	>15	Silte Vermelho
9	>15	Silte Vermelho				
10						
11						
12						
13	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-

Fonte: FERNÁNDEZ, 2017 (adaptado).

Quadro 9 – Resultados das sondagens SPT na Seção 215 Sul

Furo	IN-004-2		IN-003-6	
Coord. x	187200		187265	
Coord. y	8247442		8247348	
Data	13/03/1973		15/03/1973	
Cota	1049		1045	
Prof. Total	-20,65		-19,45	
NA	-11,2		-9,5	
Prof. (m)	Nspt	Descrição da camada	Nspt	Descrição da camada
1	4	Argila Vermelha com matéria orgânica	4	Argila Vermelha com matéria orgânica
2				
3	5 a 15	Argila siltosa Vermelha	5 a 15	Argila siltosa Vermelha
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13	5 a 15	Argila Siltosa com concreção laterítica		
14				
15	>15	Silte Argiloso rosa	>15	Silte Argiloso
16				
17				
18				
19				
20				
21			-	-

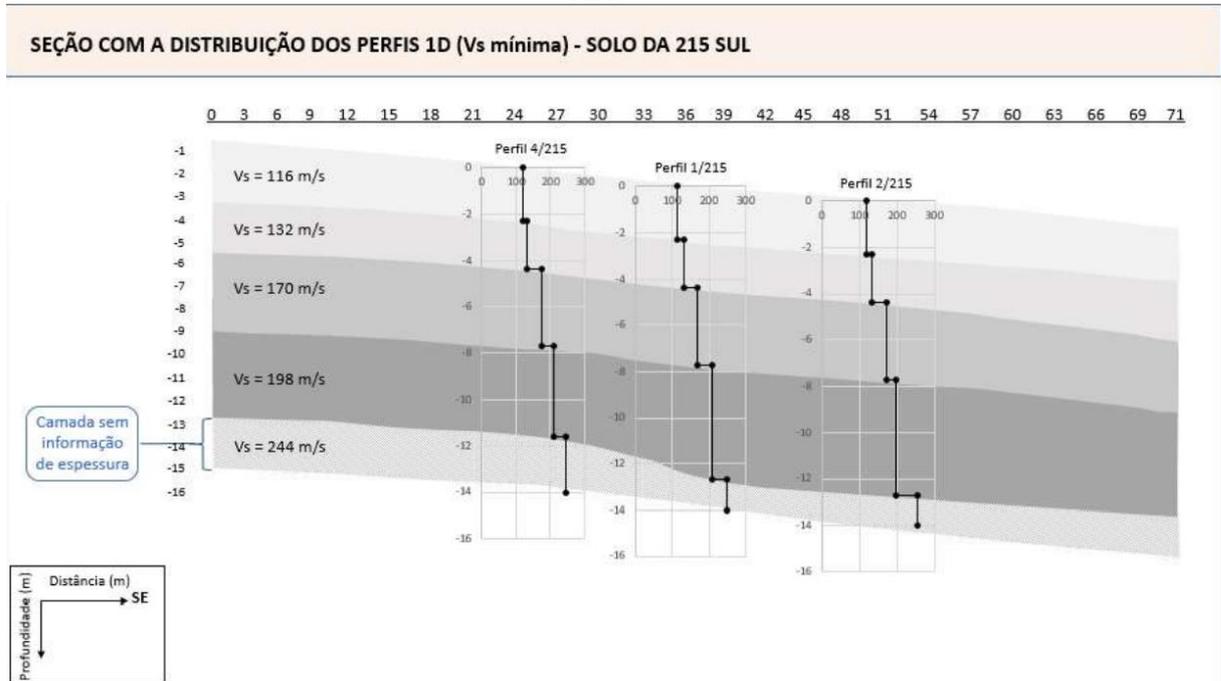
Fonte: FERNÁNDEZ, 2017 (adaptado).

4.2.2 Sondagem Geofísica

As Figura 11, Figura 12, Figura 13 e Figura 14 mostram os perfis de solo obtidos a partir dos valores de V_s obtidos por meio do ensaio MASW, realizado por Fernandez (2017) nas quadras 215 Sul e 115 Sul, respectivamente, cuja localização pode ser verificada nas Figura 9 e Figura 10. Assim, o autor definiu três pontos em cada perfil para registrar os valores máximos e mínimos de V_s em cada metro de profundidade. É possível notar que nos perfis dos solos da quadra 215 apresentam uma maior estratificação, com os valores médios de V_s variando entre

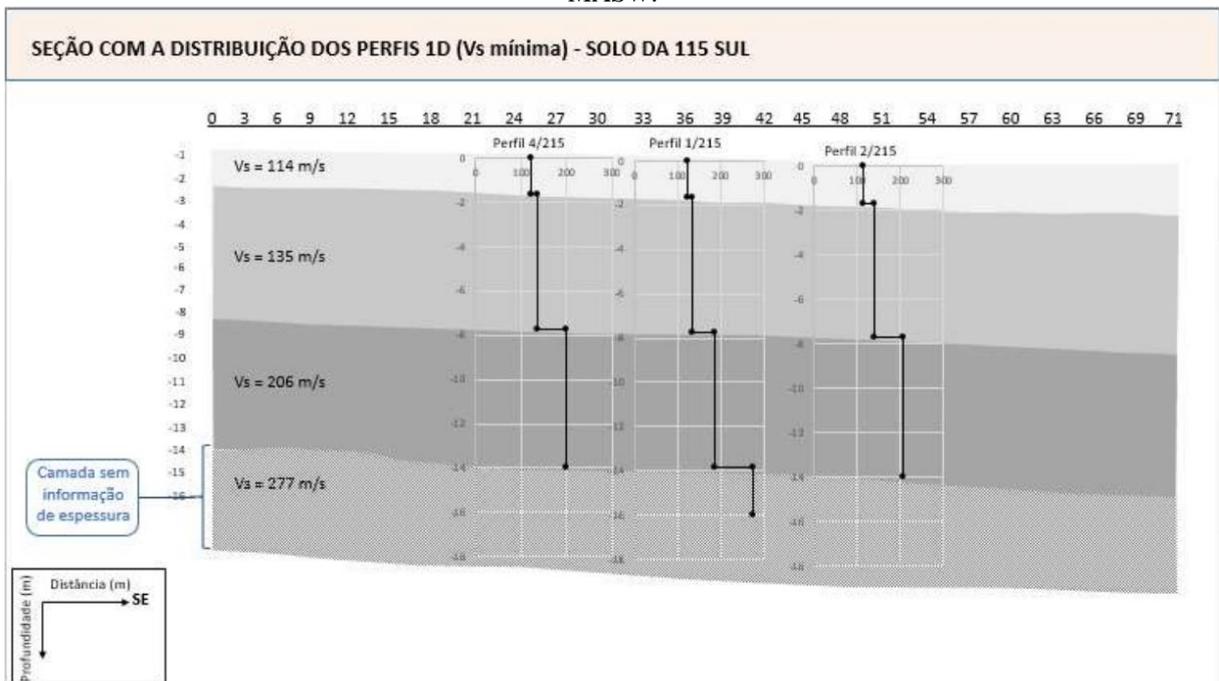
5 camadas de solo. Já na quadra 115, nota-se apenas 3 camadas com valores semelhantes de V_s .

Figura 11 – Seção 2D de velocidades mínimas ($V_{s,min}$) da SQS 215, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.



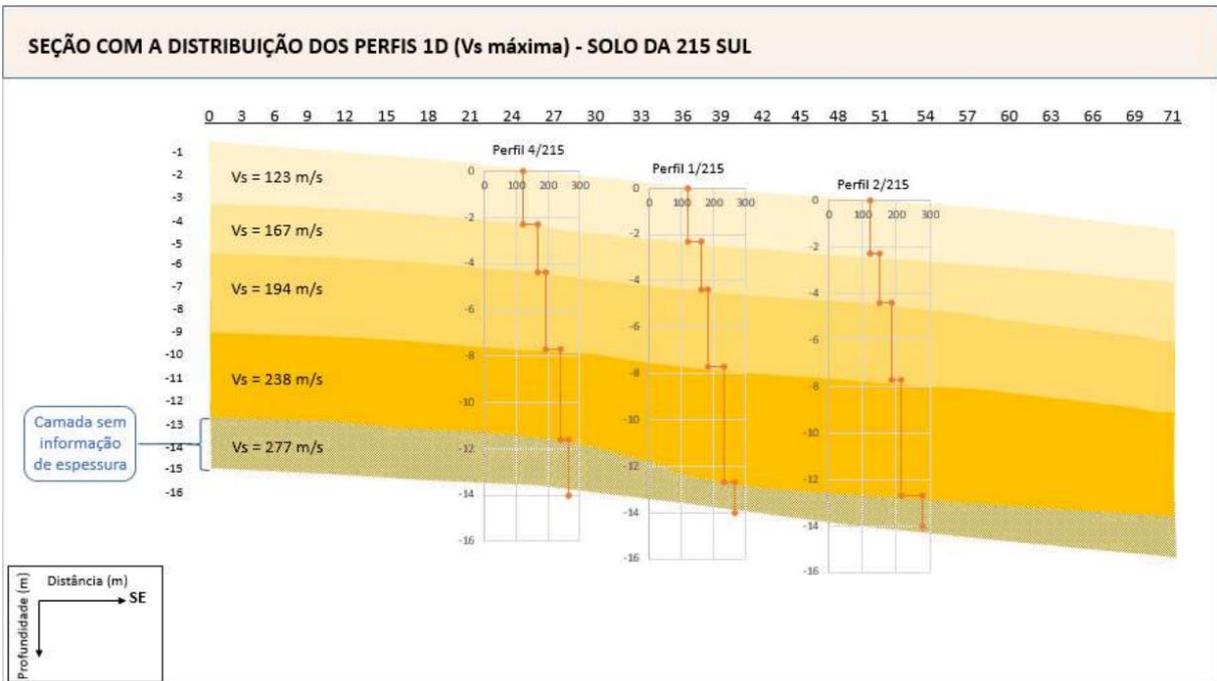
Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

Figura 12 - Seção 2D de velocidades mínimas ($V_{s,min}$) da SQS 115, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.



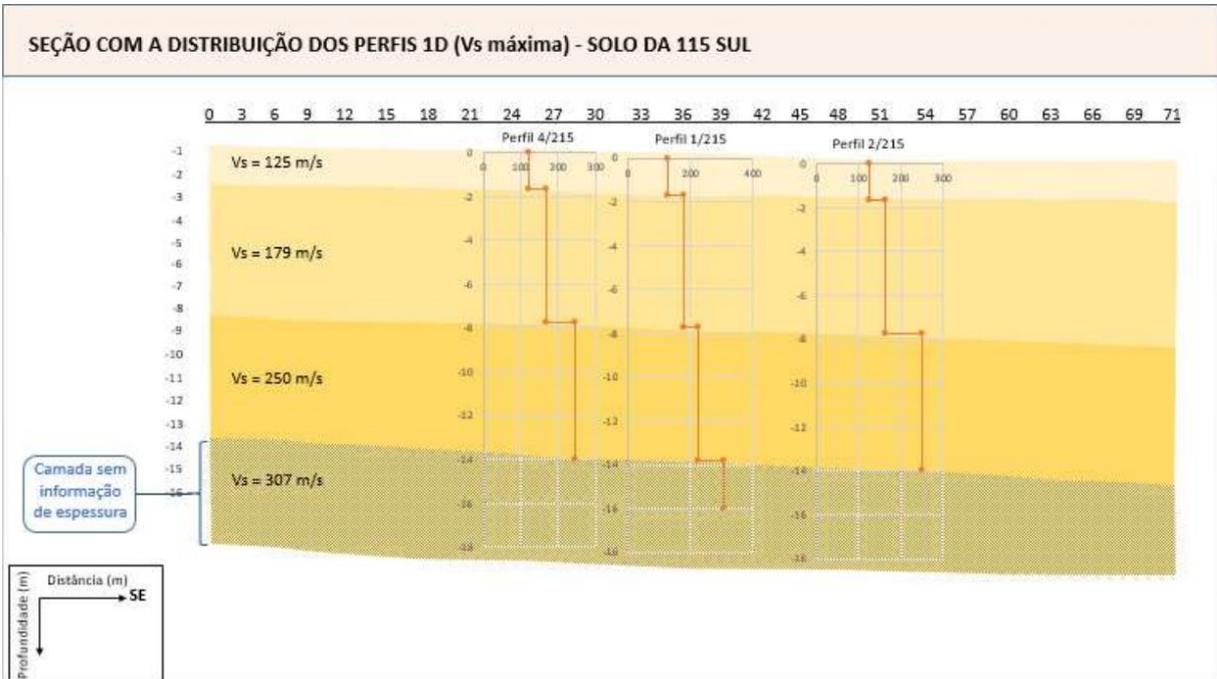
Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

Figura 13 - Seção 2D de velocidades máximas ($V_{s,max}$) da SQS 215, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.



Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

Figura 14 - Seção 2D de velocidades máximas ($V_{s,max}$) da SQS 115, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.



Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam os valores V_s encontrados, que correspondem à média entre os valores máximos e mínimos, bem como a densidade de cada camada, onde é

possível notar o aumento dos valores conforme aumenta a profundidade das camadas de solo, juntamente com um aumento da densidade do solo.

Tabela 4 – Valores de V_s e de densidade obtidos por meio de MASW na SQS 215.

Perfil	1/215		2/215		4/215	
Cota	- 3m		- 3,5m		- 2m	
Prof. (m)	$V_{s,MED}$ (m/s)	ρ (g/cm ³)	$V_{s,MED}$ (m/s)	ρ (g/cm ³)	$V_{s,MED}$ (m/s)	ρ (g/cm ³)
1	117,5	1,76	121	1,76	122	1,76
2	117,5	1,76	121	1,76	122	1,76
3	147	1,77	141	1,77	141,5	1,77
4	147	1,77	141	1,77	141,5	1,77
5	176	1,78	180,5	1,78	178,5	1,78
6	176	1,78	180,5	1,78	178,5	1,78
7	176	1,78	180,5	1,78	178,5	1,78
8	176	1,78	180,5	1,78	178,5	1,78
9	220	1,79	206	1,79	212	1,79
10	220	1,79	206	1,79	212	1,79
11	220	1,79	206	1,79	212	1,79
12	258	1,80	206	1,79	249	1,80
13	258	1,80	266,5	1,80	249	1,80
14	258	1,80	266,5	1,80	249	1,80

Fonte: Adaptado de FERNÁNDEZ, 2017.

Tabela 5 – Valores de V_s e de densidade obtidos por meio de MASW na SQS 115.

Perfil	1/115		2/115		4/115	
Cota	- 1m		- 1m		- 1m	
Prof. (m)	$V_{s,MED}$ (m/s)	ρ (g/cm ³)	$V_{s,MED}$ (m/s)	ρ (g/cm ³)	$V_{s,MED}$ (m/s)	ρ (g/cm ³)
1	123,5	1,76	119	1,76	122	1,76
2	123,5	1,76	119	1,76	122	1,76
3	151	1,77	150,5	1,77	153	1,77
4	151	1,77	150,5	1,77	153	1,77
5	151	1,77	150,5	1,77	153	1,77
6	151	1,77	150,5	1,77	153	1,77
7	151	1,77	150,5	1,77	153	1,77
8	151	1,77	150,5	1,77	153	1,77
9	206	1,78	221,5	1,78	221,5	1,78
10	206	1,78	221,5	1,78	221,5	1,78
11	206	1,78	221,5	1,78	221,5	1,78
12	206	1,78	221,5	1,78	221,5	1,78
13	206	1,78	221,5	1,78	221,5	1,78
14	206	1,78	221,5	1,78	221,5	1,78

Fonte: Adaptado de FERNÁNDEZ, 2017.

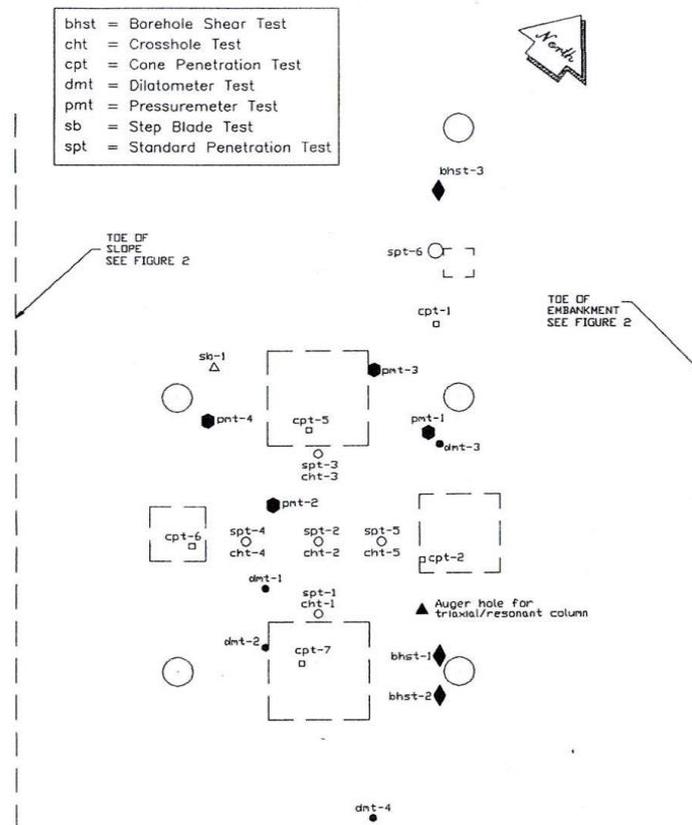
4.3 CAMPO GEOTÉCNICO EXPERIMENTAL DA UNIVERSIDADE NACIONAL DO TEXAS

O estudo realizado por Briaud e Gibbens (1994) no campo geotécnico experimental da Universidade Nacional do Texas consistiu em apresentar os resultados de teste de carga bem

como os dados da análise de sondagens em um solo predominantemente arenoso. Os ensaios de sondagem realizados consistiram no teste de cisalhamento em furos de sondagem (do inglês *borehole shear test*), ensaio *cross-hole*, CPT, dilatômetro, pressurômetro, ensaio de palheta e SPT.

Para este trabalho, serão considerados apenas os resultados dos ensaios *cross-hole* e SPT apresentados no estudo de Briaud e Gibbens (1994). A Figura 15 mostra a locação das sondagens realizadas, onde as sondagens SPT se concentram na região central juntamente com os ensaios *Cross-hole*.

Figura 15 – Locação das sondagens realizadas no campo geotécnico experimental da Universidade Nacional do Texas

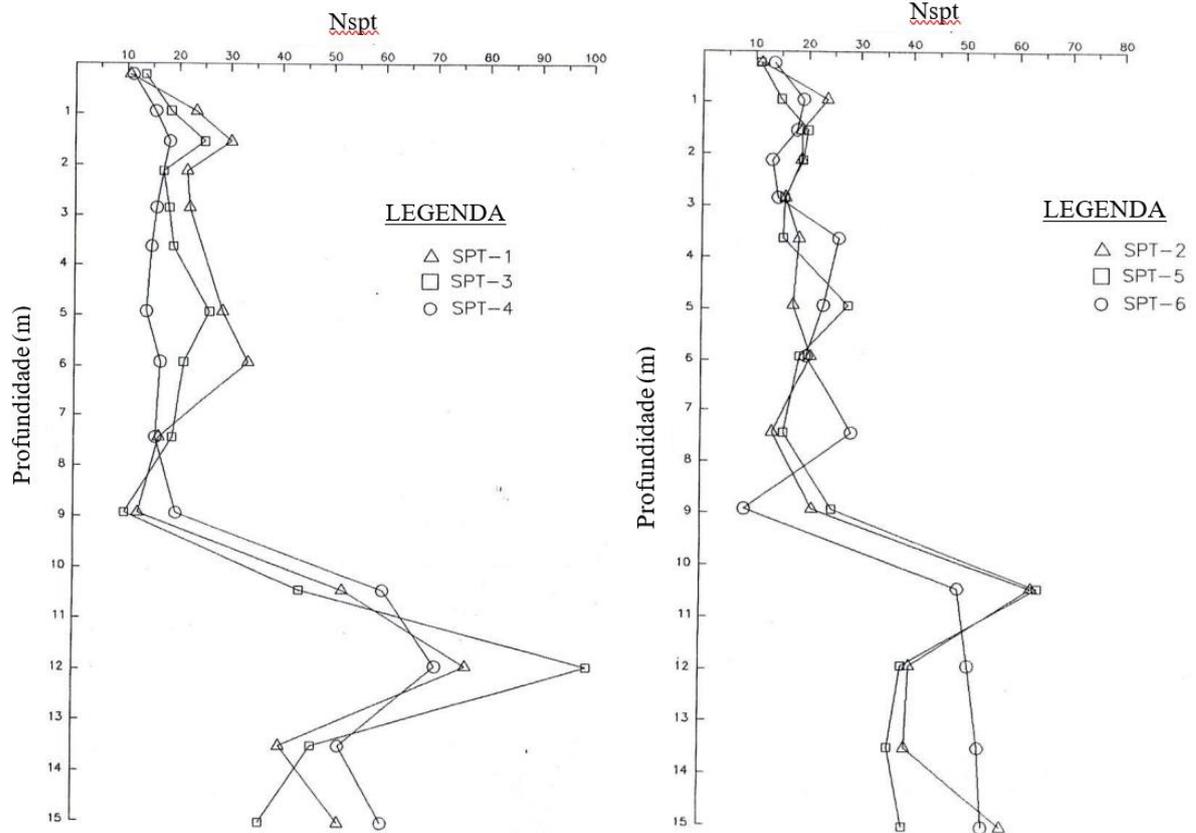


Fonte: BRIAUD E GIBBENS, 1994.

4.3.1 Sondagem SPT

A Figura 16 mostra os perfis SPT obtidos no estudo de Briaud e Gibbens (1994). As sondagens escolhidas para este trabalho tratam-se das sondagens SPT-1, SPT-2 e SPT-5, que correspondem aos furos em que foram disponibilizados os resultados dos ensaios de *Cross-hole*, como mostrado na Figura 15. O tipo de solo encontrado nas sondagens foi um solo arenoso (POULOS, 2021).

Figura 16 – Perfis de sondagem para o campo experimental do Texas



Fonte: BRIAUD E GIBBENS, 1994.

4.3.2 Sondagem Geofísica

Os ensaios de onda cisalhante foram realizados em duas direções ortogonais e a profundidades específicas, e os resultados são apresentados na Tabela 6. Os furos de sondagens utilizados para obter os valores de V_s na direção Norte-Sul foram o cht 1 e o cht 2, que possuem uma distância entre eixos de $d = 2,415\text{m}$. Já os furos para medição na direção Leste-Oeste foram o cht 2 e o cht 5, com $d = 1,924\text{m}$ de distância.

Tabela 6 – Valores de V_s para as direções Norte-Sul e Leste-Oeste

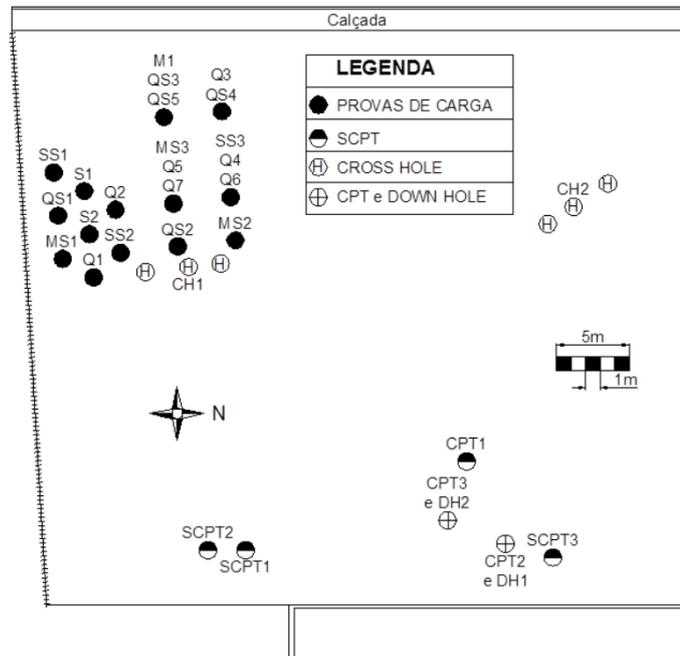
Profundidade (m)	V_s (m/s) – Direção Norte-Sul	V_s (m/s) – Direção Leste-Oeste
2	240	202
4	300	211
6	281	210
8	199	170
10	238	230

Fonte: Adaptado de BRIAUD E GIBBENS, 1994.

4.4 CAMPO EXPERIMENTAL DE SÃO CARLOS

O estudo realizado por Souza (2011) envolveu a análise de várias campanhas de ensaios realizadas no campo experimental de EESC-USP São Carlos, com o intuito de aplicar um método para a previsão da curva tensão-recalque de fundações diretas assentes em solos tropicais arenosos a partir de resultados de ensaios de cone sísmico. Foram executados dois ensaios *down-hole* (DH1 e DH2) com o sistema desenvolvido por Vitali (2011), um ensaio SCPT (SCPT3) com cone sísmico comercial e três ensaios CPT (CPT1, CPT2 e CPT3), além de dois ensaios *cross-hole* (CH1 e CH2) e de dois ensaios SCPT (SCPT1, SCPT2 e SCPT3). A Figura 17 ilustra a locação dos ensaios realizados.

Figura 17 – Locação dos ensaios de campo realizados no campo experimental da EESC/USP – São Carlos.



Fonte: SOUZA, 2011.

4.4.1 Ensaios de Laboratório

Para esse estudo, foram realizados diversos ensaios de laboratório para caracterizar os solos que ocorrem neste local. Como o foco do trabalho de Souza (2011) foi a análise do comportamento de fundações diretas, então só foram obtidos os índices físicos para as camadas superiores do solo, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Índices físicos médios para o campo experimental de São Carlos

Prof. (m)	γ (kN/m ³)	W (%)	e	n (%)	S (%)
1	14,2	13,7	1,174	54	38
2	15,6	14,6	0,993	50	52
3	16,0	15,8	0,965	50	58
4	16,7	16,8	0,943	49	70
5	14,8	16,4	0,822	47	60

Fonte: SOUZA, 2011.

4.4.2 Sondagem Geofísica

Os dados apresentados por Souza (2011) para os valores de V_s são mostrados nas Tabela 8 à Tabela 10. Os dados foram divididos entre cada método utilizado para obtenção dos dados.

Tabela 8 – Dados de V_s obtidos por meio do ensaio *Down-hole* para o campo experimental de São Carlos

Prof. (m)	DH1	DH2	DH3
	V_s (m/s)	V_s (m/s)	V_s (m/s)
2,5	310,71	329,18	-
3	285,05	314,29	391,16
3,5	292,70	335,83	-
4	297,04	317,76	352,43
4,5	335,40	316,29	-
5	330,65	317,03	314,34

Fonte: SOUZA, 2011.

Tabela 9 – Dados de V_s obtidos por meio de ensaio *Cross-hole* para o campo experimental de São Carlos

Prof. (m)	CH1 – V_s (m/s)	Prof. (m)	CH2 – V_s (m/s)
0,7	238	0,5	193,33
1,2	260	1,5	223,58
1,7	263	2,5	254,42
2,2	270	3,5	269,12
2,7	266	4,5	293,42
3,2	277	5,5	304,62
3,7	311	-	-
4,2	311	-	-
4,7	317	-	-
5,2	308	-	-
5,7	282	-	-

Fonte: SOUZA, 2011.

Tabela 10 -Dados de V_s obtidos por ensaio de SCPT para o campo experimental de São Carlos

Prof. (m)	SCPT 1 – V_s (m/s)	SCPT 2 – V_s (m/s)
1,4	185,30	149,97
2,4	264,84	221,08
3,4	298,67	288,68
4,4	293,39	281,29
5,4	300,04	303,74

Fonte: SOUZA, 2011.

5 RESULTADOS

Neste tópico, serão apresentados os resultados encontrados a partir da aplicação das correlações envolvendo o valor de V_s com parâmetros geotécnicos para os estudos de caso apresentados.

5.1 N-ESTIMADO X N-SPT

Utilizando as correlações apresentadas no Quadro 4, foi possível encontrar o valor de N_E a partir do valor de V_s . Assim, foi calculado o valor médio de N_E entre todas as correlações, tomando como base os dados obtidos na Asa Sul de Brasília e no campo experimental do Texas, e então comparado com os valores medidos nas respectivas sondagens SPT. Os resultados de cada método individualmente estão apresentados no Apêndice A.

5.1.1 Asa Sul de Brasília

As Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13 apresentam os resultados para os valores de N estimados por meio das correlações em cada um dos perfis de sondagem por MASW nas quadras 215 Sul e 115 Sul. Foi feita uma média inicial dos valores utilizando correlações para todos os tipos de solos bem como uma média utilizando as correlações para solos finos e argilosos. Além disso, os valores foram comparados com os valores das sondagens SPT.

Para a quadra 215 temos então os seguintes resultados:

Tabela 11 – Valores de N estimados a partir de V_s para o perfil de sondagem 1/215.

Prof (m)	N_{SPT}	Todos os solos	Desvio Padrão	Argilas	Desvio Padrão	Siltos	Desvio Padrão	Total	Desvio Padrão
1	4	4	4	3	2	6	4	4	4
2	4	4	4	3	2	6	4	4	4
3	5 a 15	8	7	5	3	9	6	6	6
4	5 a 15	8	7	5	3	9	6	6	6
5	5 a 15	13	10	8	3	14	8	10	9
6	5 a 15	13	10	8	3	14	8	10	9
7	5 a 15	13	10	8	3	14	8	10	9
8	5 a 15	13	10	8	3	14	8	10	9
9	5 a 15	21	14	15	4	23	16	16	12
10	5 a 15	21	14	15	4	23	16	16	12
11	5 a 15	21	14	15	4	23	16	16	12
12	5 a 15	28	13	23	7	30	18	20	12
13	5 a 15	28	13	23	7	30	18	20	12
14	5 a 15	28	13	23	7	30	18	20	12

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 12 - Valores de N estimados a partir de Vs para o perfil de sondagem 2/215.

Prof (m)	N _{SPT}	Todos os solos	Desvio Padrão	Argilas	Desvio Padrão	Siltes	Desvio Padrão	Total	Desvio Padrão
1	4	5	5	3	2	6	4	4	4
2	4	5	5	3	2	6	4	4	4
3	5 a 15	7	6	5	2	8	5	6	5
4	5 a 15	7	6	5	2	8	5	6	5
5	5 a 15	13	11	9	3	15	9	10	9
6	5 a 15	13	11	9	3	15	9	10	9
7	5 a 15	13	11	9	3	15	9	10	9
8	5 a 15	13	11	9	3	15	9	10	9
9	5 a 15	19	14	12	4	20	13	14	12
10	5 a 15	19	14	12	4	20	13	14	12
11	5 a 15	19	14	12	4	20	13	14	12
12	5 a 15	19	14	12	4	20	13	14	12
13	5 a 15	30	13	25	8	31	17	21	12
14	5 a 15	30	13	25	8	31	17	21	12

Fonte: Autor, 2022.

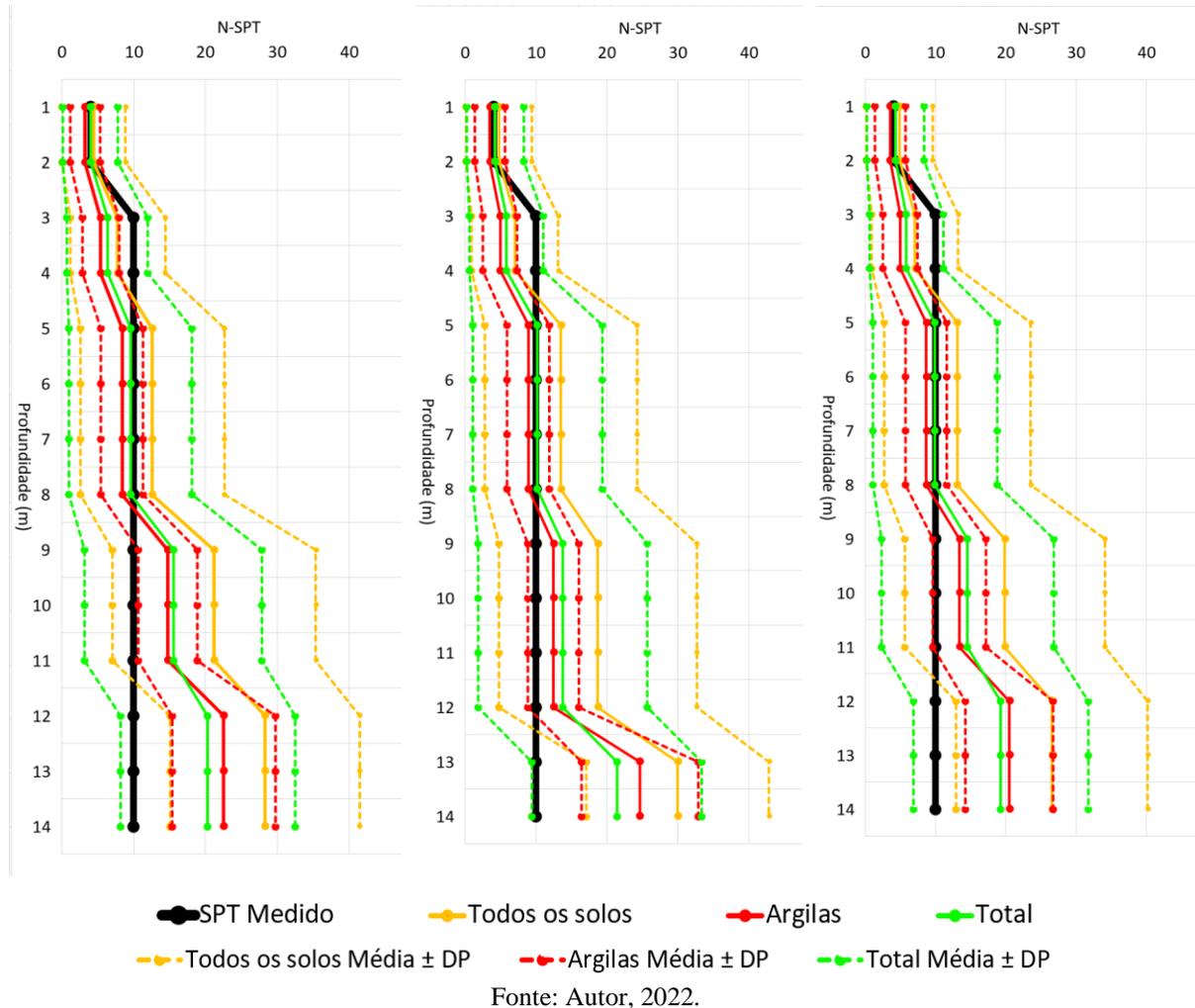
Tabela 13 - Valores de N estimados a partir de Vs para o perfil de sondagem 4/215.

Prof (m)	N _{SPT}	Todos os solos	Desvio Padrão	Argilas	Desvio Padrão	Siltes	Desvio Padrão	Total	Desvio Padrão
1	4	5	5	4	2	6	4	4	4
2	4	5	5	4	2	6	4	4	4
3	5 a 15	7	6	5	2	9	5	6	5
4	5 a 15	7	6	5	2	9	5	6	5
5	5 a 15	13	10	9	3	14	9	10	9
6	5 a 15	13	10	9	3	14	9	10	9
7	5 a 15	13	10	9	3	14	9	10	9
8	5 a 15	13	10	9	3	14	9	10	9
9	5 a 15	20	14	13	4	21	14	15	12
10	5 a 15	20	14	13	4	21	14	15	12
11	5 a 15	20	14	13	4	21	14	15	12
12	5 a 15	27	14	20	6	29	18	19	12
13	5 a 15	27	14	20	6	29	18	19	12
14	5 a 15	27	14	20	6	29	18	19	12

Fonte: Autor, 2022.

A Figura 18 apresenta os gráficos de sondagem para cada perfil, considerando os valores médios com desvio padrão para as correlações que se aplicam a todos os solos e a solos argilosos, bem como a média dos valores.

Figura 18 – Gráficos dos valores de N_{SPT} e N_E com desvio padrão (em tracejado) para a quadra 215 Sul
 Perfil 1/215 Perfil 2/215 Perfil 4/215



Como foram utilizadas apenas 3 correlações para solos com silte, elas foram consideradas no gráfico Todos, pois apresentaram um desvio padrão maior que as demais correlações, e também para não prejudicar a análise visual do gráfico.

No relatório de sondagem SPT apresentado no Quadro 9, o valor do N_{SPT} para profundidades acima de 2 m é dado como o intervalo de 5 a 15. Assim, para poder ter a visualização gráfica, adotou-se o valor médio de $N_{SPT} = 10$ para a construção do gráfico.

É possível verificar também a dispersão dos dados através do Coeficiente de Variância (CV), que é dado pelo quociente do desvio padrão pela média dos dados. Assim, para os perfis da quadra 215 Sul, foram obtidos os valores de CV apresentados na Tabela 14.

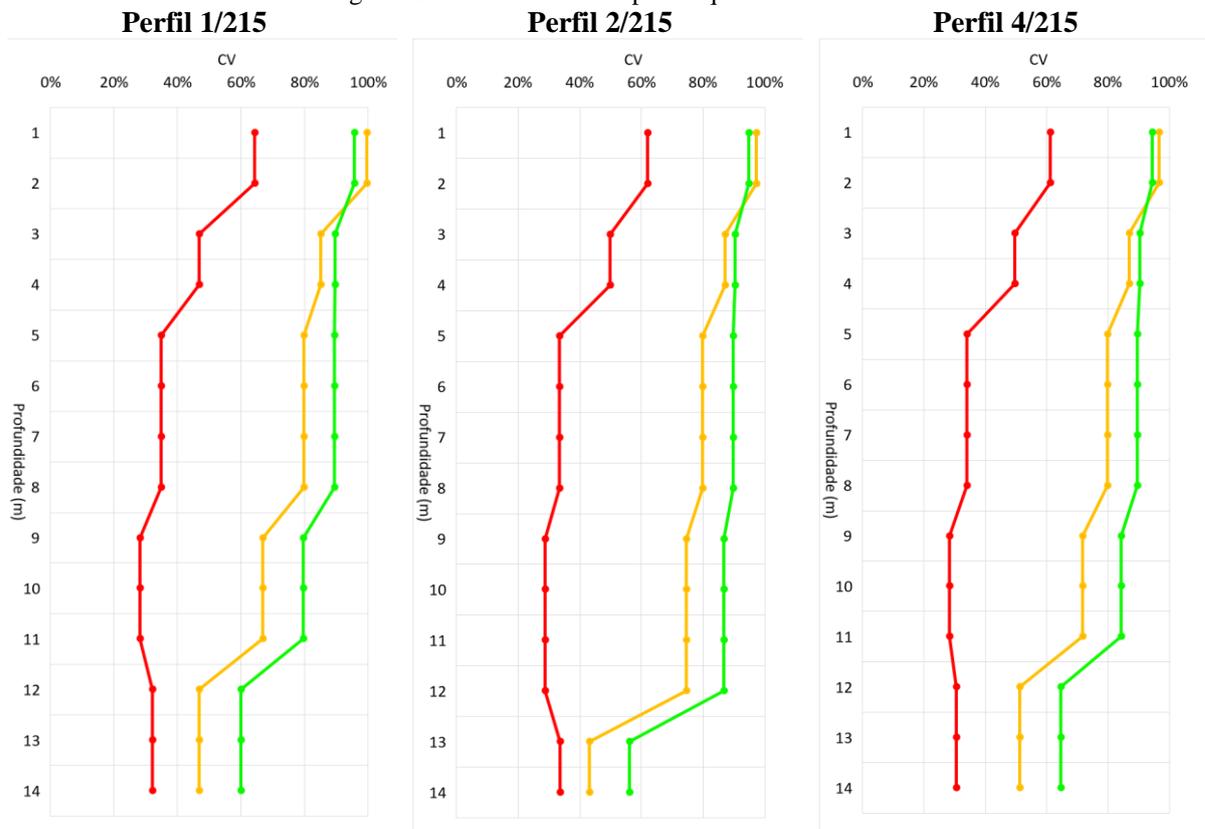
Tabela 14 – Coeficientes de Variância (em %) para os resultados obtidos na quadra 215 Sul.

Perfil 1/215				Perfil 2/215				Perfil 4/215			
Prof. (m)	Todos os solos	Argilas	Total	Prof. (m)	Todos os solos	Argilas	Total	Prof. (m)	Todos os solos	Argilas	Total
1	100	64	96	1	97	62	95	1	97	61	94
2	100	64	96	2	97	62	95	2	97	61	94
3	85	47	90	3	87	50	90	3	87	50	90
4	85	47	90	4	87	50	90	4	87	50	90
5	80	35	89	5	80	33	90	5	80	34	90
6	80	35	89	6	80	33	90	6	80	34	90
7	80	35	89	7	80	33	90	7	80	34	90
8	80	35	89	8	80	33	90	8	80	34	90
9	67	28	80	9	75	29	87	9	72	28	84
10	67	28	80	10	75	29	87	10	72	28	84
11	67	28	80	11	75	29	87	11	72	28	84
12	47	32	60	12	75	29	87	12	51	31	65
13	47	32	60	13	43	34	56	13	51	31	65
14	47	32	60	14	43	34	56	14	51	31	65

Fonte: Autor, 2022.

Graficamente temos:

Figura 19 – Gráficos de CV para a quadra 215 Sul.



— Todos os solos — Argilas — Todos

Fonte: Autor, 2022.

Já para a quadra 115 Sul temos os resultados das correlações apresentados na Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 15 – Valores de N estimados a partir de Vs para o perfil de sondagem 1/115.

Prof (m)	N real	Todos os solos	Desvio Padrão	Argilas	Desvio Padrão	Siltes	Desvio Padrão	Total	Desvio Padrão
1	4	5	5	4	2	6	4	4	4
2	4	5	5	4	2	6	4	4	4
3	4	8	7	6	3	10	6	7	6
4	4	8	7	6	3	10	6	7	6
5	4	8	7	6	3	10	6	7	6
6	5 a 15	8	7	6	3	10	6	7	6
7	> 15	8	7	6	3	10	6	7	6
8	> 15	8	7	6	3	10	6	7	6
9	> 15	19	14	12	4	20	13	14	12
10	> 15	19	14	12	4	20	13	14	12
11	> 15	19	14	12	4	20	13	14	12
12	> 15	19	14	12	4	20	13	14	12
13	> 15	19	14	12	4	20	13	14	12
14	> 15	19	14	12	4	20	13	14	12
15	> 15	34	13	32	12	34	14	25	12

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 16 - Valores de N estimados a partir de Vs para o perfil de sondagem 2/115.

Prof (m)	N real	Todos os solos	Desvio Padrão	Argilas	Desvio Padrão	Siltes	Desvio Padrão	Total	Desvio Padrão
1	4	5	5	3	2	6	4	4	4
2	4	5	5	3	2	6	4	4	4
3	4	8	7	6	3	10	6	7	6
4	4	8	7	6	3	10	6	7	6
5	4	8	7	6	3	10	6	7	6
6	4	8	7	6	3	10	6	7	6
7	4	8	7	6	3	10	6	7	6
8	5 a 15	8	7	6	3	10	6	7	6
9	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
10	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
11	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
12	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
13	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
14	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
15	> 15	5	5	3	2	6	4	4	4

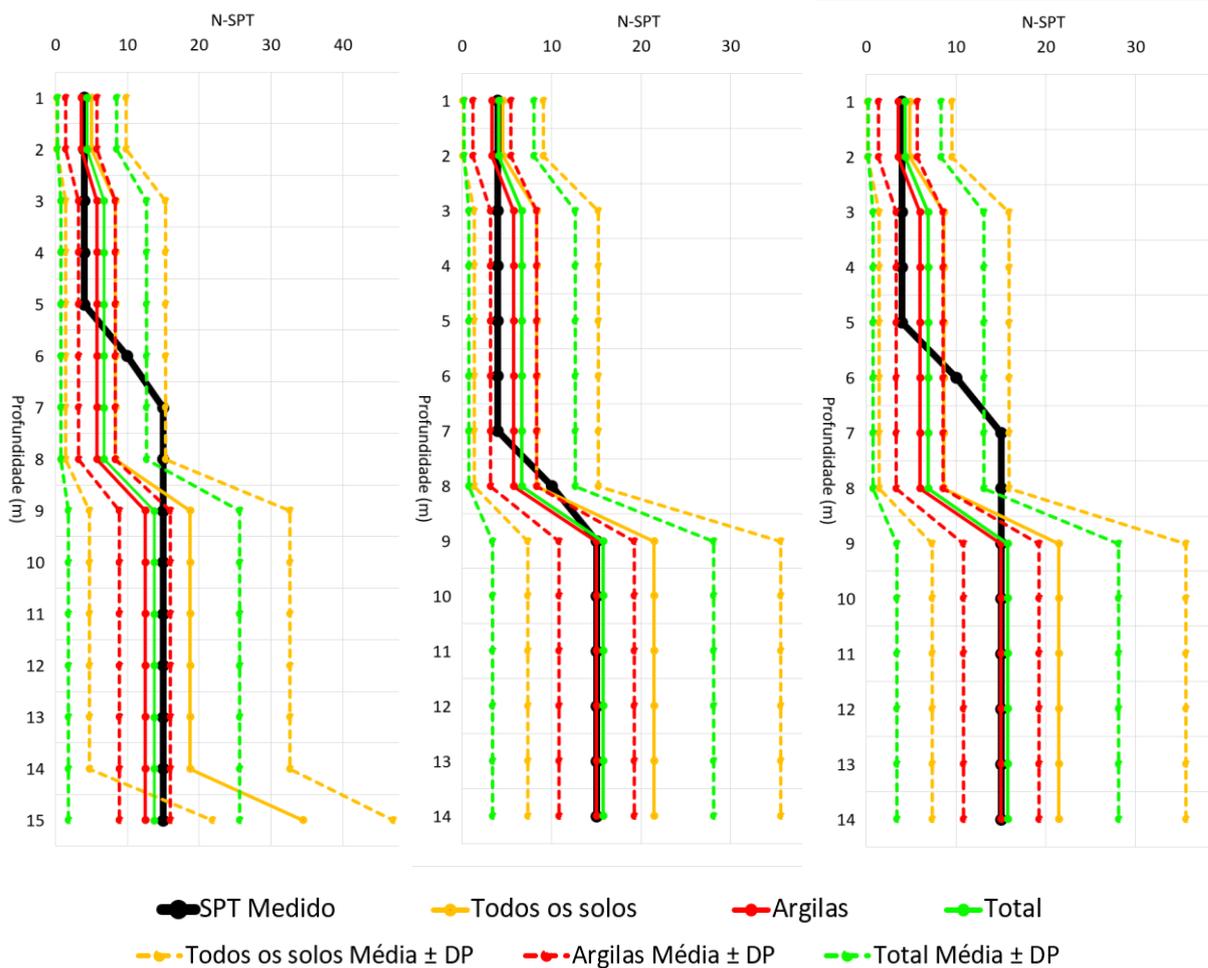
Fonte: Autor, 2022.

Tabela 17 - Valores de N estimados a partir de Vs para o perfil de sondagem 4/115.

Prof (m)	N real	Todos os solos	Desvio Padrão	Argilas	Desvio Padrão	Siltes	Desvio Padrão	Total	Desvio Padrão
1	4	5	5	4	2	6	4	4	4
2	4	5	5	4	2	6	4	4	4
3	4	9	7	6	3	10	6	7	6
4	4	9	7	6	3	10	6	7	6
5	4	9	7	6	3	10	6	7	6
6	5 a 15	9	7	6	3	10	6	7	6
7	> 15	9	7	6	3	10	6	7	6
8	> 15	9	7	6	3	10	6	7	6
9	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
10	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
11	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
12	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
13	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
14	> 15	21	14	15	4	24	16	16	12
15	> 15	5	5	4	2	6	4	4	4

Fonte: Autor, 2022.

Figura 20 - Gráficos dos valores de N_{SPT} e N_E com desvio padrão (em tracejado) para a quadra 115 Sul
 Perfil 1/115 Perfil 2/115 Perfil 4/115



Fonte: Autor, 2022.

Para os perfis da quadra 115 Sul, os valores de N_{SPT} apresentados no Quadro 8 foram adotados como sendo 10 para os valores do intervalo de 5 a 15, e 15 para valores > 15 .

Uma maior acurácia das correlações voltadas a solos argilosos pode ser verificada pelo coeficiente de variância também no perfil da quadra 115 Sul.

Tabela 18 – Valores de CV (em %) para a quadra 115 Sul

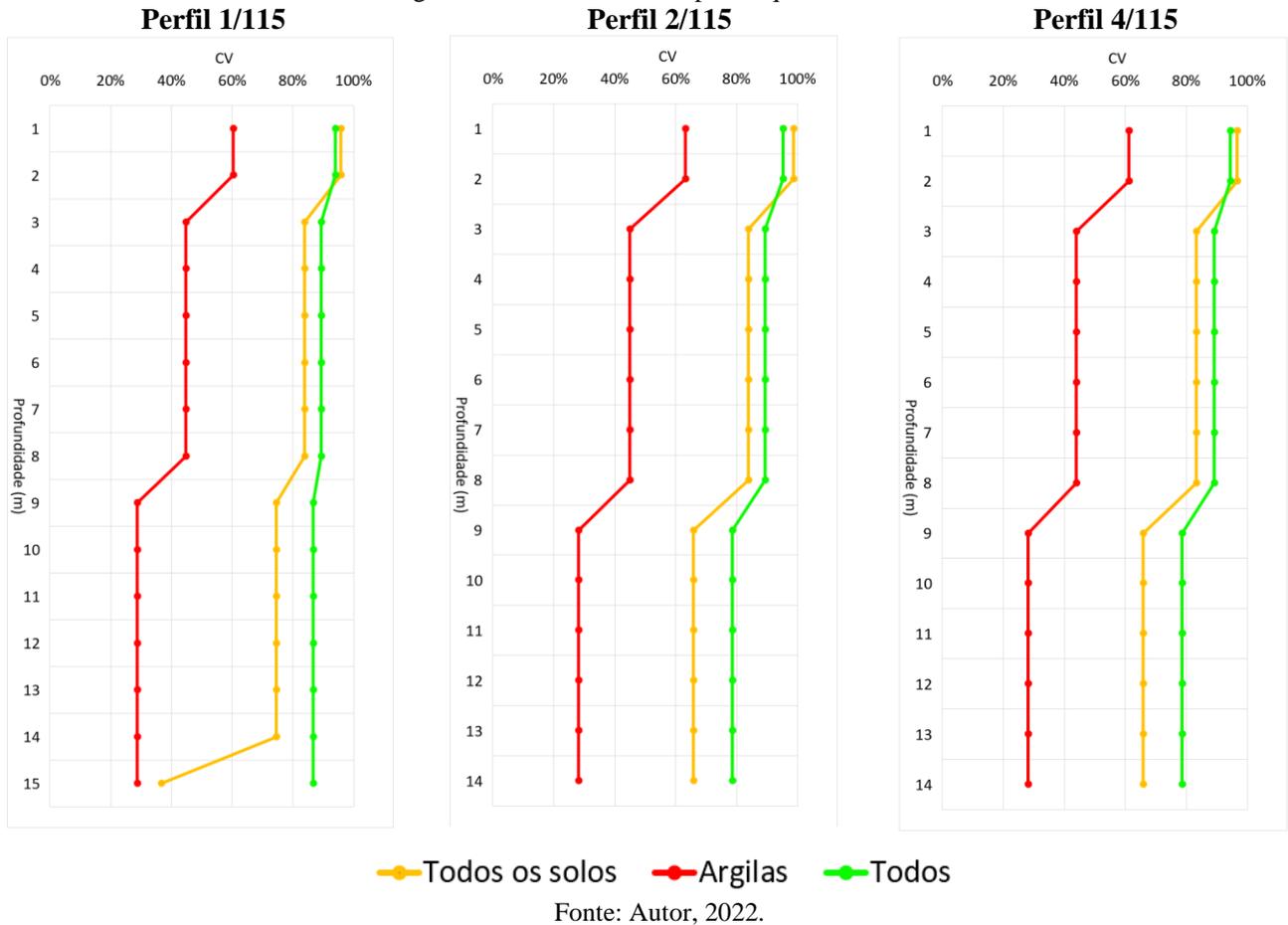
Perfil 1/115				Perfil 2/115				Perfil 4/115			
Prof. (m)	Todos os solos	Argilas	Total	Prof. (m)	Todos os solos	Argilas	Total	Prof. (m)	Todos os solos	Argilas	Total
1	96	60	94	1	99	63	95	1	97	61	94
2	96	60	94	2	99	63	95	2	97	61	94
3	84	45	89	3	84	45	89	3	83	44	89
4	84	45	89	4	84	45	89	4	83	44	89
5	84	45	89	5	84	45	89	5	83	44	89
6	84	45	89	6	84	45	89	6	83	44	89
7	84	45	89	7	84	45	89	7	83	44	89
8	84	45	89	8	84	45	89	8	83	44	89
9	75	29	87	9	66	28	79	9	66	28	79
10	75	29	87	10	66	28	79	10	66	28	79
11	75	29	87	11	66	28	79	11	66	28	79
12	75	29	87	12	66	28	79	12	66	28	79
13	75	29	87	13	66	28	79	13	66	28	79
14	75	29	87	14	66	28	79	14	66	28	79
15	37	29	87	15	99	63	95	15	97	61	94

Fonte: Autor, 2022.

Percebe-se pela Figura 18 e pela Figura 20 que o valor médio para as correlações que têm sua aplicação voltadas especificamente para solos argilosos apresentaram um desvio padrão menor em relação à média obtida pelas correlações que se aplicam a todos os tipos de solos ou a solos com predominância de silte. Além disso, o coeficiente de variação, apresentado na Figura 19 e pela Figura 21 demonstra uma menor dispersão dos dados quando se utilizam essas correlações.

Assim, através dessa análise nota-se que as correlações que têm sua aplicação voltadas para solos específicos, podem apresentar um resultado com maior acurácia quando aplicadas para seu respectivo solo. Com uma dispersão inferior a 30% para as maiores profundidades, é possível avaliar a utilização de um intervalo dos valores obtidos pelas correlações para o projeto de obras geotécnicas.

Figura 21 – Gráficos de CV para a quadra 115 Sul



5.1.2 Campo Geotécnico Experimental do Texas

A Tabela 19 e a Tabela 20 apresentam os resultados obtidos de N estimado a partir do V_s por meio das correlações para todos os tipos de solos, além de considerar as correlações específicas para solos arenosos. O $N_{E,MED}$ foi obtido considerando a média aritmética dos valores de N_e obtidos na direção Norte-Sul e Leste-Oeste. Para as sondagens SPT Norte-Sul, fora considerados as sondagens SPT 01 e SPT 02, e para a direção Leste-Oeste foram usados os furos SPT 02 e SPT 05.

Tabela 19 - Valores de N estimados a partir de V_s na direção Norte-Sul para o Campo Experimental do Texas.

Prof. (m)	Nspt Real	Todos os solos	Desvio Padrão	Areias	Desvio Padrão	Total	Desvio Padrão
2	22	25	14	27	11	25	13
4	22	37	11	41	9	38	11
6	27	33	12	37	10	34	11
8	16	17	14	17	9	17	12
10	45	24	14	26	11	25	13

Fonte: Autor, 2022.

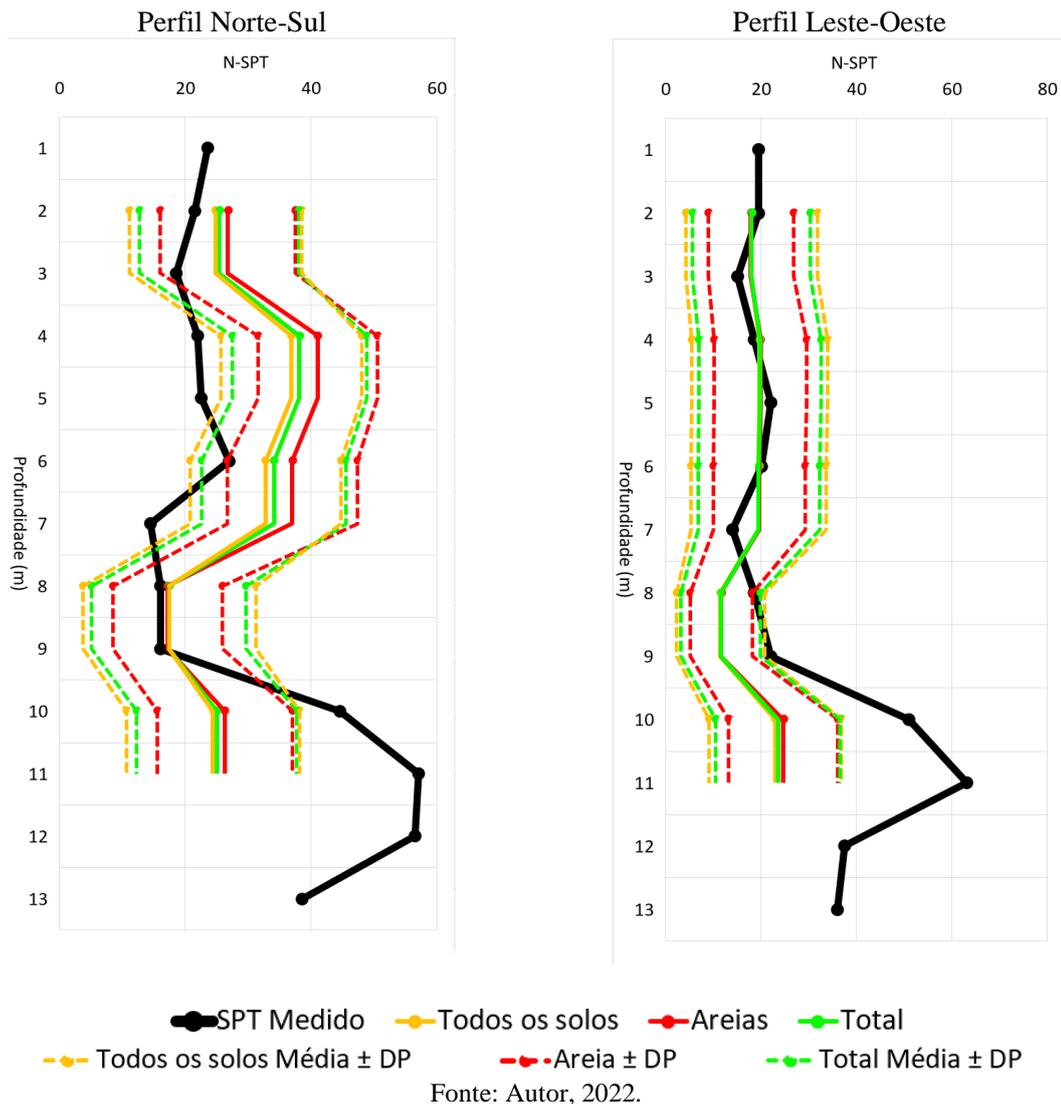
Tabela 20 - Valores de N estimados a partir de Vs na direção Leste-Oeste para o Campo Experimental do Texas.

Prof. (m)	Nspt Real	Todos os solos	Desvio Padrão	Areias	Desvio Padrão	Total	Desvio Padrão
2	20	18	14	18	9	18	12
4	19	20	14	20	10	20	13
6	20	19	14	20	10	20	13
8	19	11	9	12	7	12	8
10	51	23	14	25	11	23	13

Fonte: Autor, 2022.

A Figura 22 ilustra os valores médios de N estimado pelas as correlações que se aplicam a todos os tipos de solos bem como as que se aplicam especificamente para solos arenosos, juntamente com o intervalo correspondente ao desvio padrão.

Figura 22 - Gráficos dos valores de N_{SPT} e N_E com desvio padrão (em tracejado) para o campo Experimental do Texas, considerando os perfis de sondagem nas direções Norte-Sul e Leste-Oeste.



Os resultados estimados por meio das correlações se mostraram próximos em ambos os perfis, à exceção do perfil Norte-Sul entre as profundidades de 4 a 7 m, onde o perfil real obtido pela sondagem SPT apresentou uma resistência bem abaixo do valor estimado. Já o perfil Leste-Oeste apresentou uma acurácia considerável entre o resultado medido e os resultados estimados nos primeiros 8 m. Para as profundidades inferiores, o valor medido apresenta um aumento expressivo, excedendo o valor de $N_{SPT} = 50$.

A variância nesse caso é apresentada na Tabela 21.

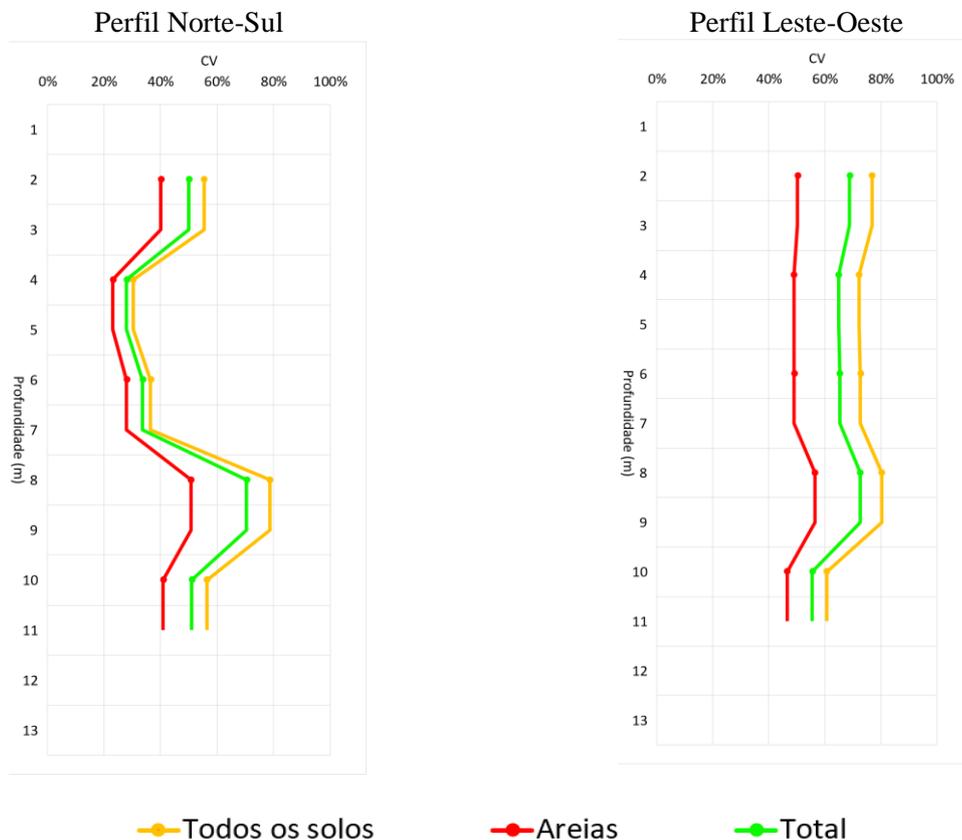
Tabela 21 – Cv (em %) para o campo experimental do Texas

Prof. (m)	Perfil Norte-Sul			Perfil Leste-Oeste		
	Todos os solos	Areias	Total	Todos os solos	Areias	Total
2	55	40	50	77	50	69
4	30	23	28	72	49	65
6	36	28	34	73	49	65
8	79	51	70	80	56	72
10	56	41	51	61	46	55

Fonte: Autor, 2022.

Graficamente temos:

Figura 23 – CV para o campo experimental do Texas



Fonte: Autor, 2022.

Verificou-se um uma divergência entre os valores obtidos com os resultados encontrados por Poulos (2021) que atingiu valores mais aproximados entre o N_E e o N_{SPT} , como mostra a Tabela 22.

Tabela 22 - Valor médio de N_E obtido por Poulos (2021) para os valores do estudo de Briaud e Gibbens (1994)

Prof. (m)	Vs (N-S) m/s	Vs (L-O) m/s	Ne (N-S)	Ne (L-O)	Ne médio
2	240	202	18	13	15,5
4	300	211	28	14	21
6	281	210	25	14	19,5
8	199	170	12	9	10,5
10	238	230	18	17	17,5

Fonte: POULOS, 2021.

Essa divergência entre os valores, que representa uma diferença média de aproximadamente 40%, pode ser explicada pelo número de correlações utilizadas. Em seu estudo, Poulos (2021) utilizou um número menor de correlações em relação a este trabalho, sugerindo a grande variedade de correlações possa ter gerado um desvio maior da média. É possível notar pelos resultados apresentados nos Apêndices A, B e C que algumas correlações apresentaram valores de N_E consideravelmente altos, o que pode estar associado à metodologia de suas determinações ou ao tipo de solo estudado.

Assim, é importante que a escolha das correlações a serem utilizadas seja mais criteriosa, para evitar que correlações inapropriadas para determinado tipo de solo influencie na média final. Isso se evidencia pelo valor considerável do coeficiente de variação apresentado para os resultados nos campos de estudo da Asa Sul de Brasília e no campo experimental do Texas. Valores de CV acima de 30%, como foi o caso da maioria dos resultados, já apontam uma alta dispersão, indicando uma heterogeneidade dos dados. Já para dados com uma dispersão menor que 30%, é possível estudar a possibilidade de se adotar valores dentre desse intervalo para tornar o projeto mais conservador ou menos conservador.

5.2 PARÂMETROS DE PROJETO ESTIMADOS A PARTIR DE V_s

Os parâmetros de projeto, foram estimados a partir das correlações apresentadas nos itens 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4 e 3.4.5 deste trabalho. Foram utilizados os valores de V_s do estudo de Fernández (2017) para se estimar os valores dos parâmetros analisados. Os resultados encontrados foram comparados com os valores de referência encontrados na literatura para os tipos de solos encontrados nas sondagens.

Os valores do módulo de cisalhamento, resistência não drenada, módulo de Poisson e módulo de deformabilidade estimados a partir dos valores de V_S e V_P para cada perfil das seções 215 Sul e 115 Sul estão apresentados no Apêndice D e no Apêndice E. Os valores de V_P utilizados nos cálculos são os apresentados na Tabela 23 e na Tabela 24.

Tabela 23 – Valores de V_P para a quadra 215 Sul

Prof. (m)	Perfil 1/215	Perfil 2/215	Perfil 4/215
1	411	411	411
2	411	411	411
3	411	411	411
4	411	411	411
5	411	411	411
6	411	411	411
7	411	411	411
8	411	411	411
9	411	411	411
10	411	411	411
11	411	411	411
12	1601	1601	1601
13	1601	1601	1601
14	1601	1601	1601

Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

Tabela 24 – Valores de V_P para a quadra 115 Sul

Prof. (m)	Perfil 1/115	Perfil 2/115	Perfil 4/115
1	405	405	405
2	405	405	405
3	405	405	405
4	405	405	405
5	405	405	405
6	405	405	405
7	405	405	405
8	405	405	405
9	405	405	405
10	405	405	405
11	405	405	405
12	405	405	405
13	405	405	405
14	405	405	405

Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

Através da análise dos resultados obtidos, foi possível dividir o perfil do solo em camadas distintas baseadas nos valores dos parâmetros encontrados. Na quadra 215 Sul foi possível dividir em 5 camadas, já a quadra 115 Sul apresentou 3 camadas distintas de solo.

Tomando como base o módulo de cisalhamento (G_0), na seção 215 os valores variam de 24,30 MPa a até 127,84 MPa. Já na seção 115 os valores variam de 24,92 MPa a 87,33 MPa, sendo que este valor aumentou conforme a profundidade.

Com relação à resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), os valores mostraram-se divergentes entre as duas correlações aplicadas, onde a correlação estabelecida por L'Heureux e Long (2016) apresentou valores mais conservadores, variando entre 20,07 e 65,81 kPa para a seção 215 e de 20,44 a 50,33 kPa na seção 115. Já a correlação proposta por Agayby e Mayne (2015) apresentou valores entre 35,14 e 89,53 kPa para a seção 215 e de 35,65 a 72,49 kPa na seção 115. Apesar das divergências entre os métodos dos autores, de acordo com o Quadro 5, o solo das amostras se encaixa nas faixas de valores indicadas para ambas as correlações, apresentando consistência variando de mole a rija.

Os valores para o módulo de Poisson (ν) variaram de 0,45 na camada superior sofrendo redução para 0,33 na terceira camada e aumentando novamente para 0,49 na seção 215. Já na seção 115, obteve-se valores de 0,45 na camada superior, e esse valor caiu gradativamente para 0,29 nas camadas inferiores. Esse intervalo de valores, de acordo com o Quadro 6 indica a presença de argila saturada, bem como silte nas camadas inferiores para os perfis de solo.

Com relação ao módulo de deformabilidade (E), as correlações analisadas apresentaram resultados muito próximos para os valores estimados nas duas seções. No entanto, quando comparados com os valores do Quadro 7, verifica-se que se tratam de valores bastante elevados para solos de baixa consistência. Como esse parâmetro foi obtido a partir do valor de G_0 estimado, alguns fatores que afetam o valor e G_{max} podem ter influenciado no resultado de E . Como apresentado por Barros (1997) e Hardin e Drnevich (1972 *apud* SOUZA, 2011), o índice de vazios, grau de saturação (particularmente em argilas e siltes), o grau de cimentação (natural ou artificial), a tensão efetiva na direção da propagação da onda bem como a tensão efetiva na direção da vibração da partícula têm uma forte influência no valor do módulo de cisalhamento do solo, o que pode ter acarretado em variações significativas do valor do módulo de deformabilidade encontrado quando se compara com os valores apresentados por Marangon (2012).

Assim, a partir dos resultados, foi possível realizar a caracterização do solo através do valor médio dos parâmetros de projeto, como apresentado no Quadro 10 e no Quadro 11.

Quadro 10 – Caracterização do perfil de solo da quadra 115 Sul a partir dos ensaios sísmicos.

Camada	Prof. (m)	Tipo de solo	Consistência	G_0 (MPa)	Su (kPa)	ν	E (MPa)
1	1 – 2	Argila	Mole a média	25,99	28,79	0,45	75,47
2	3 – 8	Argila Siltosa	Média	40,63	38,00	0,42	115,59
3	9 – 14	Argila Siltosa	Rija	83,40	59,61	0,30	220,14

Fonte: Autor, 2022.

Quadro 11 – Caracterização do perfil de solo da quadra 215 Sul a partir dos ensaios sísmicos.

Camada	Prof. (m)	Tipo de solo	Consistência	G_0 (MPa)	Su (kPa)	ν	E (MPa)
1	1 – 2	Argila Siltosa	Mole	25,42	28,40	0,45	73,95
2	3 – 4	Argila Siltosa	Mole a média	36,29	35,39	0,43	104,07
3	5 – 8	Argila Siltosa	Média	56,61	46,67	0,38	157,58
4	9 – 12	Argila Siltosa	Rija	81,02	58,33	0,32	216,18
5	13 – 14	Argila Siltosa	Rija a dura	119,75	74,48	0,49	356,08

Fonte: Autor, 2022.

A caracterização do solo, utilizando parâmetros determinados a partir das correlações com o valor de V_s obtido em ensaios sísmicos, mostrou-se similar com a caracterização tátil visual encontrada no relatório de sondagem SPT apresentado por Fernández (2017) no Quadro 8 e no Quadro 9. Os valores dos parâmetros estão de acordo com a faixa de consistência do solo determinada a partir do SPT segundo a Tabela 2.

5.3 PARÂMETROS DE PROJETO ESTIMADOS POR DIFERENTES ENSAIOS GEOFÍSICOS

A partir dos dados obtidos do estudo de caso realizado por Souza (2011) no campo experimental de São Carlos, foi possível estimar os valores do módulo de cisalhamento (G_0), resistência ao cisalhamento não drenada (Su) e o módulo de deformabilidade (E) através do valor da velocidade de onda cisalhante obtida por ensaios *cross-hole*, *down-hole* e SCPT.

O valor de G_0 foi estimado através da Equação 02, já o valor de Su foi obtido através da média dos resultados das Equações 03 e 04. O valor de E foi obtido através da Equação 6, adotando um módulo de Poisson de $\nu = 0,3$ para solos arenosos. Temos os seguintes resultados:

Tabela 25 – Parâmetros obtidos através de ensaio *cross-hole*

Prof. (m)	G_0 (MPa)	Desvio Padrão	Su (kPa)	Desvio Padrão	E (MPa)	Desvio Padrão
1,50	93,50	19,23	71,26	14,53	243,09	49,99
2,50	111,53	7,36	76,56	13,22	289,99	19,14
3,50	136,11	25,11	84,93	15,21	353,89	65,28
4,50	154,43	9,34	93,09	14,03	401,52	24,30
5,50	134,50	12,57	89,65	14,16	349,70	32,68

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 26 -Parâmetros obtidos através de ensaio *down-hole*

Prof. (m)	G₀ (MPa)	Desvio Padrão	Su (kPa)	Desvio Padrão	E (MPa)	Desvio Padrão
2,50	163,08	13,30	98,06	14,76	424,02	34,59
3,00	146,96	20,23	90,23	15,46	382,10	52,60
3,50	163,53	29,13	95,92	17,10	425,19	75,73
4,00	161,21	15,35	93,19	14,84	419,15	39,91
4,50	165,93	21,01	100,38	14,82	431,43	54,62
5,00	158,45	9,42	99,58	14,50	411,97	24,50

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 27 – Parâmetros obtidos através de ensaio SCPT

Prof. (m)	G₀ (MPa)	Desvio Padrão	Su (kPa)	Desvio Padrão	E (MPa)	Desvio Padrão
1,40	41,17	12,13	43,25	12,86	107,04	31,55
2,40	94,73	23,94	69,16	16,07	246,29	62,24
3,40	140,85	6,77	87,90	14,18	366,20	17,60
4,40	140,76	8,38	85,49	14,20	365,97	21,79
5,40	137,64	2,38	91,04	14,10	357,86	6,20

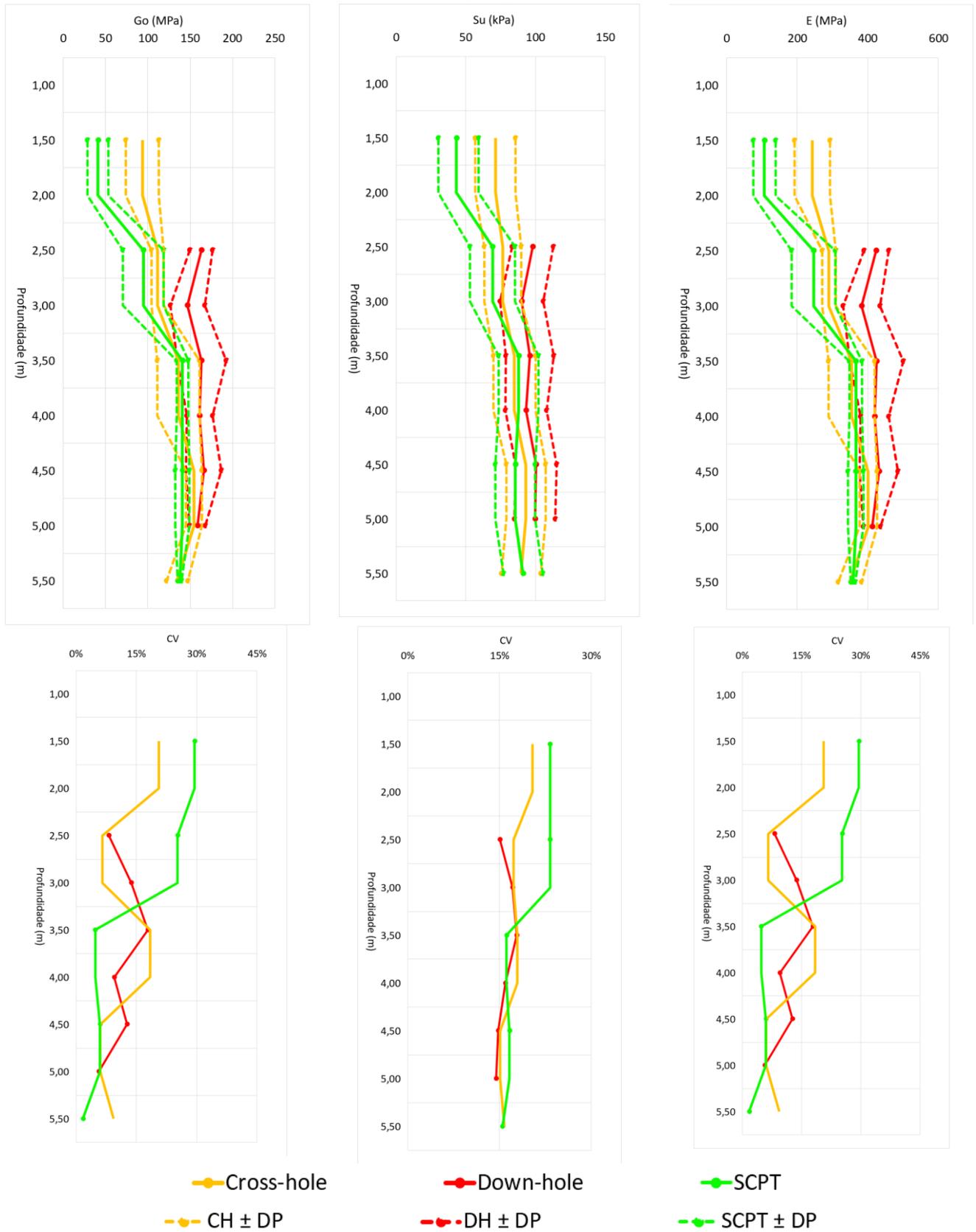
Fonte: Autor, 2022.

Assim, podemos resumir graficamente comparando os resultados obtidos em cada ensaio, como apresentado na Figura 24 que ilustra os resultados médios dos parâmetros obtidos para cada ensaio, além do desvio padrão (em tracejado). Também é possível verificar a variação entre os resultados para cada método.

Através da análise dos gráficos, é possível notar uma grande variação entre os dados nas camadas superiores do solo. No entanto, conforme avança na profundidade, os resultados tornam-se mais homogêneos entre os métodos, além de apresentarem uma menor dispersão entre si, com um coeficiente de variação inferior a 30%. Essa variação nas camadas superiores, segundo Souza (2011), pode ser atribuída à variação na compactação da camada superficial do solo, na sua composição, na variação da sucção matricial ou de uma possível interferência de ondas de superfície na interpretação dos valores de V_s . Além disso, devido às camadas iniciais geralmente se tratarem de camadas de aterro, estas tendem a apresentar uma variabilidade em seu parâmetros comparado ao que se espera de um solo natural, o que também pode refletir em divergências nos resultados de obtidos por diferentes ensaios.

Assim, para camadas mais profundas, onde é possível analisar o solo natural, espera-se um comportamento mais semelhante entre os diferentes métodos de investigação.

Figura 24 – Gráficos para os parâmetros obtidos através de diferentes ensaios no campo experimental de São Carlos



Fonte: Autor, 2022.

6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio das análises dos estudos de caso apresentados por Fernández (2017) e Briaud e Gibbens (1996), foi possível realizar um comparativo entre os resultados obtidos através de métodos geofísicos de aquisição sísmica e o ensaio SPT.

Analisando os valores de N_E obtidos para os campos estudados, os resultados para as quadras 215 Sul e 115 Sul demonstraram uma maior acurácia para as correlações que são voltadas para o tipo de solo argiloso. Já no campo experimental do Texas houve uma menor diferença entre os resultados obtidos para correlações para solos específicos e as correlações para todos os tipos de solos. Apesar de haver uma variância considerável nos resultados, nota-se uma tendência nos valores de N_E que se aproximam dos valores medidos pelo N_{SPT} , principalmente para correlações que são voltadas para o tipo de solo presente no local investigado. Assim, é pertinente que sejam realizados novos estudos de caso com essa temática para que se possa melhorar a eficiência e confiabilidade do valor de N estimado por meio de ensaios geofísicos, através de novas correlações voltadas para os solos tropicais, como é o caso do Brasil. Além disso, é necessário que sondagens de reconhecimento do solo sejam feitas previamente para identificar o tipo de solo a ser estudado, e assim selecionar quais correlações podem apresentar resultados mais próximos para a realização da investigação.

Com relação aos parâmetros de projeto que foram estimados nos campos de estudos da Asa Sul de Brasília, os resultados mostraram-se satisfatórios quanto à estimativa da resistência ao valor da resistência ao cisalhamento não drenada e ao coeficiente de Poisson, permitindo assim a classificação do solo quanto à consistência, confirmando a caracterização do solo realizada através do ensaio SPT. Com relação aos valores dos parâmetros G_0 e E para o solo, nota-se uma discrepância quando comparados à valores de referência na literatura, particularmente o valor de E , o que demonstra a necessidade em aprimorar as correlações existentes de forma a considerar fatores que influenciam o valor do módulo de cisalhamento, como apontado por Barros (1997).

Assim, foi possível obter uma caracterização geológica geotécnica para os perfis das quadras 115 Sul e 215 Sul a partir de métodos geofísicos utilizando métodos geofísicos de aquisição sísmica. O resultado demonstrou ser coerente, considerando a consistência e o caráter do solo analisado, comparado com o resultado da sondagem SPT, que é o ensaio mais utilizado para a investigação do solo. Para estudos futuros, recomenda-se a uma aplicação de mais

correlações desenvolvidas em solos brasileiros, como os estudos realizados por Barros (1997), para a obtenção desses parâmetros, bem como na estimativa do N_{SPT} .

Para o estudo de caso do campo experimental de São Carlos, os valores dos parâmetros obtidos por diferentes métodos apresentaram uma divergência considerável nas camadas superiores de solo o que, segundo Souza (2011), pode ser atribuído a variáveis como a compactação superficial do solo, ressecamento e sucção matricial ou ao fato de existir uma deficiência na aquisição dos registros de ondas S por conta da interferência de ondas de superfície como aponta Vitali (2011). Entretanto, para as camadas inferiores, os valores de V_s encontrados em ensaios *Cross-hole* e *Down-hole* se mostraram próximos aos determinados por ensaios de cone sísmico, sugerindo que esses ensaios podem ser realizados para determinar os valores de G_0 , E e S_u . Assim, recomenda-se que em estudos futuros seja feita uma análise comparativa entre esses métodos em investigações mais profundas, analisando também outros parâmetros importantes como por exemplo a variação do ângulo de atrito e a coesão do solo.

Deve-se ressaltar que o objetivo dos ensaios geofísicos não é substituir, mas sim complementar as sondagens SPT que já é um método consagrado de investigação do solo. Dessa forma, aliando a praticidade dos métodos convencionais com as vantagens dos métodos geofísicos, se torna possível realizar uma melhor caracterização geotécnica com um número maior de parâmetros sendo obtidos através de investigações *in situ* sem a necessidade de um controle rigoroso na logística para realizar a análise de amostras indeformadas em laboratório, tornando mais prática a coleta de informações e consequentemente o dimensionamento por parte do projetista geotécnico.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, abr. 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6484**: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, set. 2020.

BARROS, José Maria de Camargo. **Módulo de cisalhamento dinâmico de solos tropicais**. 1997. 437 p. Tese (Doutorado), EPUSP, São Paulo 1997.

BRIAUD, J-L.; GIBBENS, R.M. **Predicted and measured behavior of five spread footings on sand**. ASCE Geot. Special Publication No. 41. 1994.

CASTRO, Bruno Carrilho de, *et al.* **Perfis geotécnicos da Cidade de Palmas-TO por meio de sondagens SPT e ensaios geofísicos**. Belo Horizonte, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Raydel-Lorenzo/publication/309558687_Perfis_geotecnicos_da_cidade_de_Palmas_-_TO_por_meio_de_sondagens_SPT_e_ensaios_geofisicos/links/58175c4308aedc7d8968e671/Perfis-geotecnicos-da-cidade-de-Palmas-TO-por-meio-de-sondagens-SPT-e-ensaios-geofisicos.pdf. Acesso em 12 out. 2021.

FATEHNIA, Milad; HAYDEN, Myron; LANDSCHOOT, Matthew. (2015). **Correlation between Shear Wave Velocity and SPT-N Values for North Florida Soils**. EJGE. 20. 12421-12430. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283293562_Correlation_between_Shear_Wave_Velocity_and_SPT-N_Values_for_North_Florida_Soils. Acesso em 20 fev. 2022.

FERNÁNDEZ, B. P. **Caracterização geológico-geotécnica de solos da Asa Sul a partir de métodos de aquisição sísmica**. Brasília, Distrito Federal-Brasil. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas). Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Brasília, 2017.

FONSECA, A. Viana da. **Caracterização de solos residuais em projeto geotécnico assistido por ensaios**. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2008. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/67289>. Acesso em 12 out 2021.

GODLEWSKI, T.; SZCZEPANSKI, T. (2015). **Measurement of soil shear wave velocity using in situ and laboratory seismic methods – some methodological aspects**. Geol. Quarterly, 59(2): 358-366. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272806846_Measurement_of_soil_shear_wave_velocity_using_in_situ_and_laboratory_seismic_methods_-_Some_methodological_aspects. Acesso em 20 fev. 2022.

HANUMANTHARAO, C.; RAMANA, G. **Dynamic soil properties formicrozonation of Delhi, India**. Journal of earth systemscience. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/226531263_Dynamic_soil_properties_for_microzonation

ation_of_Delhi_India/citations. Acesso em 20 fev. 2022.

HEGAZY, Y.A.; MAYNE, Paul. (1995). **Statistical correlations between Vs and CPT data for different soil types**. Proc. Cone Penetration Testing (CPT'95). 2. 173-178. 1995.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/283361455_Statistical_correlations_between_Vs_and_CPT_data_for_different_soil_types. Acesso em 20 fev. 2022.

HUNT, R.E. **Geotechnical Engineering Investigation Manual**. McGraw-Hill, Nova York, 201-216. 1984.

L'HEUREUX, J.S.; LONG, M. (2017). **Correlations between shear wave velocity and geotechnical parameters in Norwegian clays**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 04017013-1 to 20. Disponível em:

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/317759597_Correlations_between_shear_wave_velocity_and_geotechnical_parameters_in_Norwegian_clays. Acesso em 20 fev. 2022.

KUMAR, Shiv; KRISHNA, A. Murali; ARNDAM, Dey. **Parameters Influencing Dynamic Soil Properties: A Review Treatise**. 2013. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/281115088_Parameters_Influencing_Dynamic_Soil_Properties_A_Review_Treatise?enrichId=rgreq-a362fb7c242fc636f3470683d9d629e6-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4MTEwNTA4ODtBUzo1MzM0Mzg3NzM5NDg0MTdAMTUwNDE5MzEyMjgwMQ%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf. Acesso em 20 fev. 2022.

MAJSTOROVIC, Jelena; GLICORIC, Milos; LUTOVAC, Suzana; NEGOVANOVIC, Milanka; CRNOGORAC, Luka. (2019). **Correlation of uniaxial compressive strength with the dynamic elastic modulus, P - wave velocity and S - wave velocity of different rock types**. Podzemni radovi. 2019. 11-25. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/334390780_Correlation_of_uniaxial_compressive_strength_with_the_dynamic_elastic_modulus_P_-_wave_velocity_and_S_-_wave_velocity_of_different_rock_types. Acesso em 20 fev. 2022.

MARANGON, Marcio. **Mecânica dos Solos: Capítulo 06 – Empuxos de Terra**.

Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de Engenharia – Departamento de Transportes e Geotecnia. 2018.

MAYNE, Paul W. **Enhanced geotechnical site characterization by seismic piezocone penetration tests**. Invited Lecture, Fourth International Geotechnical Conference, Cairo University, janeiro 2000, pp. 95-120

POULOS, Harry George. **Use of Shear Wave Velocity for Foundation Design**. 2021.

Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-493427/v1>. Acesso em 20 fev. 2022.

ROCHA, Breno Padovezi; GIACHETI, Heraldo Luiz. **Site characterization of a tropical soil by in situ test**. Medellín, v. 85, n. 206, p. 211-219, sept. 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.67891>. Acesso em 12 out. 2021.

SANTOS, Roberto A. dos; ROCHA, Breno Padovezi; GIACHETI, Heraldo Luiz. **Maximum Shear Modulus by In-situ Tests and its use for Site Characterization of a Tropical Soil.** International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Rio de Janeiro, 2018.

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

SOUZA, Luiz Antonio; GANDOLFO, Otavio. **Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental.** Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2. 9-27. 2012.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/268799604_Metodos_geofisicos_em_geotecnia_e_geologia_ambiental. Acesso em 20 fev. 2022.

SOUZA, Tiago de Jesus. **Previsão da curva tensão-recalque em solos tropicais arenosos a partir de ensaios de cone sísmico.** 2011. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

doi:10.11606/D.18.2011.tde-25042012-163755. Acesso em: 27 fev. 2022.

VITALI, Osvaldo Paiva Magalhães. **Desenvolvimento de um sistema para a realização de ensaios sísmicos *down-hole* em conjunto com o CPT.** São Carlos, São Paulo.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação e Área de concentração em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. 2011. Disponível em:

10.11606/D.18.2011.tde-01122011-100235. Acesso em 20 fev. 2022.

APÊNDICE A – RESULTADOS DE N ESTIMADOS PARA A QUADRA 115 SUL

VALOR DE Ne - Perfil 115 - 1/115																																
Profundidade (m)	Todos os solos																		Argilas							Siltes						
	Kanai (1966)	Imai e Yoshimura (1970)	Fujiwara(1972)	Ohsaki e Iwasaki (1973)	Imai et al (1975)	Imai (1977)	Fialho Rodrigues (1979)	Seed e Idriss (1981)	Imai e Tonouchi (1982)	Yokoto et al (1991)	Kalteziotis et al (1992)	Athanasopoulos (1995)	Iyisan (1996)	Jafari et al (1997)	Imai (1997)	Kiku et al (2001)	Anbazhagan e Sitharam (2006)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Maheshwari (2008)	Dikmen (2009)	Imai (1977)	JRA (1980)	Lee (1990)	Kalteziotis (1992)	Maugeri e Carruba (1997)	Jafari et al (2002)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Dikmen (2009)	Fatehnia (2015)	Lee (1990)	Jafari et al (2002)	Dikmen (2009)
1	23	3	2	3	3	2	3	4	2	1	7	1	5	8	2	8	9	3	2	7	2	2	1	3	6	8	2	5	4	2	9	8
2	23	3	2	3	3	2	3	4	2	1	7	1	5	8	2	8	9	3	2	7	2	2	1	3	6	8	2	5	4	2	9	8
3	32	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	5	8	11	5	7	7	3	12	14
4	32	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	5	8	11	5	7	7	3	12	14
5	32	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	5	8	11	5	7	7	3	12	14
6	32	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	5	8	11	5	7	7	3	12	14
7	32	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	5	8	11	5	7	7	3	12	14
8	32	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	5	8	11	5	7	7	3	12	14
9	50	13	11	11	11	11	15	11	11	7	50	6	15	14	9	44	32	15	13	26	11	9	7	9	14	16	16	14	16	8	18	34
10	50	13	11	11	11	11	15	11	11	7	50	6	15	14	9	44	32	15	13	26	11	9	7	9	14	16	16	14	16	8	18	34
11	50	13	11	11	11	11	15	11	11	7	50	6	15	14	9	44	32	15	13	26	11	9	7	9	14	16	16	14	16	8	18	34
12	50	13	11	11	11	11	15	11	11	7	50	6	15	14	9	44	32	15	13	26	11	9	7	9	14	16	16	14	16	8	18	34
13	50	13	11	11	11	11	15	11	11	7	50	6	15	14	9	44	32	15	13	26	11	9	7	9	14	16	16	14	16	8	18	34
14	50	13	11	11	11	11	15	11	11	7	50	6	15	14	9	44	32	15	13	26	11	9	7	9	14	16	16	14	16	8	18	34
15	50	32	31	26	32	31	43	23	33	26	50	16	29	21	22	50	50	45	42	63	37	26	21	20	27	26	58	29	43	24	29	50

VALOR DE Ne - Perfil 115 - 2/115																																
Profundidade (m)	Todos os solos																		Argilas							Siltes						
	Kanai (1966)	Imai e Yoshimura (1970)	Fujiwara(1972)	Ohsaki e Iwasaki (1973)	Imai et al (1975)	Imai (1977)	Fialho Rodrigues (1979)	Seed e Idriss (1981)	Imai e Tonouchi (1982)	Yokoto et al (1991)	Kalteziotis et al (1992)	Athanasopoulos (1995)	Iyisan (1996)	Jafari et al (1997)	Imai (1997)	Kiku et al (2001)	Anbazhagan e Sitharam (2006)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Maheshwari (2008)	Dikmen (2009)	Imai (1977)	JRA (1980)	Lee (1990)	Kalteziotis (1992)	Maugeri e Carruba (1997)	Jafari et al (2002)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Dikmen (2009)	Fatehnia (2015)	Lee (1990)	Jafari et al (2002)	Dikmen (2009)
1	21	3	2	3	2	2	3	4	2	1	6	1	5	7	2	7	8	2	2	6	2	2	1	3	5	8	2	4	3	1	9	7
2	21	3	2	3	2	2	3	4	2	1	6	1	5	7	2	7	8	2	2	6	2	2	1	3	5	8	2	4	3	1	9	7
3	31	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	4	8	11	5	7	7	3	12	14
4	31	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	4	8	11	5	7	7	3	12	14
5	31	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	4	8	11	5	7	7	3	12	14
6	31	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	4	8	11	5	7	7	3	12	14
7	31	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	4	8	11	5	7	7	3	12	14
8	31	6	4	5	5	4	6	6	4	2	17	3	8	10	4	15	15	5	5	12	4	3	2	4	8	11	5	7	7	3	12	14
9	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41
10	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41
11	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41
12	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41
13	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41
14	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41

VALOR DE Ne - Perfil 115 - 4/115																																
Profundidade (m)	Todos os solos																			Argilas							Siltes					
	Kanai (1966)	Imai e Yoshimura (1970)	Fujiwara(1972)	Ohsaki e Iwasaki (1973)	Imai et al (1975)	Imai (1977)	Fialho Rodrigues (1979)	Seed e Idriss (1981)	Imai e Tonouchi (1982)	Yokoto et al (1991)	Kalteziotis et al (1992)	Athanasopoulos (1995)	Iyisan (1996)	Jafari et al (1997)	Imai (1997)	Kiku et al (2001)	Anbazhagan e Sitharam (2006)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Maheshwari (2008)	Dikmen (2009)	Imai (1977)	JRA (1980)	Lee (1990)	Kalteziotis (1992)	Maugeri e Carruba (1997)	Jafari et al (2002)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Dikmen (2009)	Fatehnia (2015)	Lee (1990)	Jafari et al (2002)	Dikmen (2009)
1	22	3	2	3	2	2	3	4	2	1	7	1	5	8	2	7	9	3	2	7	2	2	1	3	5	8	2	5	4	2	9	8
2	22	3	2	3	2	2	3	4	2	1	7	1	5	8	2	7	9	3	2	7	2	2	1	3	5	8	2	5	4	2	9	8
3	32	6	5	5	5	5	6	6	4	2	18	3	8	10	4	16	15	6	5	12	4	4	3	5	8	11	5	8	7	3	12	15
4	32	6	5	5	5	5	6	6	4	2	18	3	8	10	4	16	15	6	5	12	4	4	3	5	8	11	5	8	7	3	12	15
5	32	6	5	5	5	5	6	6	4	2	18	3	8	10	4	16	15	6	5	12	4	4	3	5	8	11	5	8	7	3	12	15
6	32	6	5	5	5	5	6	6	4	2	18	3	8	10	4	16	15	6	5	12	4	4	3	5	8	11	5	8	7	3	12	15
7	32	6	5	5	5	5	6	6	4	2	18	3	8	10	4	16	15	6	5	12	4	4	3	5	8	11	5	8	7	3	12	15
8	32	6	5	5	5	5	6	6	4	2	18	3	8	10	4	16	15	6	5	12	4	4	3	5	8	11	5	8	7	3	12	15
9	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41
10	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41
11	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41
12	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41
13	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41
14	50	16	14	13	14	14	19	13	14	9	50	7	17	15	11	50	38	18	17	31	14	11	9	11	16	18	21	16	20	10	20	41

APÊNDICE B – RESULTADOS DE N ESTIMADOS PARA A QUADRA 215 SUL

VALOR DE Ne - Perfil 215 - 1/215																																
Profundidade (m)	Todos os solos																	Argilas							Siltes							
	Kanai (1966)	Imai e Yoshimura (1970)	Fujiwara(1972)	Ohsaki e Iwasaki (1973)	Imai et al (1975)	Imai (1977)	Fialho Rodrigues (1979)	Seed e Idriss (1981)	Imai e Tonouchi (1982)	Yokoto et al (1991)	Kalteziotis et al (1992)	Athanasopoulos (1995)	Iyisan (1996)	Jafari et al (1997)	Imai (1997)	Kiku et al (2001)	Anbazhagan e Sitharam (2006)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Maheshwari (2008)	Dikmen (2009)	Imai (1977)	JRA (1980)	Lee (1990)	Kalteziotis (1992)	Maugeri e Carruba (1997)	Jafari et al (2002)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Dikmen (2009)	Fatehnia (2015)	Lee (1990)	Jafari et al (2002)	Dikmen (2009)
1	21	3	2	3	2	2	3	4	2	1	6	1	5	7	2	6	8	2	2	6	2	2	1	3	5	7	2	4	3	1	9	7
2	21	3	2	3	2	2	3	4	2	1	6	1	5	7	2	6	8	2	2	6	2	2	1	3	5	7	2	4	3	1	9	7
3	30	5	4	4	4	4	6	6	4	2	15	2	8	9	4	14	14	5	4	11	3	3	2	4	8	10	5	7	6	3	12	13
4	30	5	4	4	4	4	6	6	4	2	15	2	8	9	4	14	14	5	4	11	3	3	2	4	8	10	5	7	6	3	12	13
5	41	9	7	7	7	7	10	8	7	4	33	4	11	12	6	26	22	9	8	17	6	6	4	6	11	13	9	10	10	5	15	22
6	41	9	7	7	7	7	10	8	7	4	33	4	11	12	6	26	22	9	8	17	6	6	4	6	11	13	9	10	10	5	15	22
7	41	9	7	7	7	7	10	8	7	4	33	4	11	12	6	26	22	9	8	17	6	6	4	6	11	13	9	10	10	5	15	22
8	41	9	7	7	7	7	10	8	7	4	33	4	11	12	6	26	22	9	8	17	6	6	4	6	11	13	9	10	10	5	15	22
9	50	15	13	13	14	13	19	13	14	9	50	7	17	15	10	50	37	18	16	31	14	11	8	10	16	18	20	16	19	10	20	41
10	50	15	13	13	14	13	19	13	14	9	50	7	17	15	10	50	37	18	16	31	14	11	8	10	16	18	20	16	19	10	20	41
11	50	15	13	13	14	13	19	13	14	9	50	7	17	15	10	50	37	18	16	31	14	11	8	10	16	18	20	16	19	10	20	41
12	50	23	21	19	22	21	30	18	23	17	50	11	23	18	16	50	50	30	28	46	24	18	14	15	21	22	37	22	30	16	24	50
13	50	23	21	19	22	21	30	18	23	17	50	11	23	18	16	50	50	30	28	46	24	18	14	15	21	22	37	22	30	16	24	50
14	50	23	21	19	22	21	30	18	23	17	50	11	23	18	16	50	50	30	28	46	24	18	14	15	21	22	37	22	30	16	24	50

VALOR DE Ne - Perfil 215 - 2/215																																
Profundidade (m)	Todos os solos																	Argilas							Siltos							
	Kanai (1966)	Imai e Yoshimura (1970)	Fujiwara(1972)	Ohsaki e Iwasaki (1973)	Imai et al (1975)	Imai (1977)	Fialho Rodrigues (1979)	Seed e Idriss (1981)	Imai e Tonouchi (1982)	Yokoto et al (1991)	Kalteziotis et al (1992)	Athanasopoulos (1995)	Iyisan (1996)	Jafari et al (1997)	Imai (1997)	Kiku et al (2001)	Anbazzhagan e Sitharam (2006)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Maheshwari (2008)	Dikmen (2009)	Imai (1977)	JRA (1980)	Lee (1990)	Kalteziotis (1992)	Maugeri e Carruba (1997)	Jafari et al (2002)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Dikmen (2009)	Fatehnia (2015)	Lee (1990)	Jafari et al (2002)	Dikmen (2009)
1	22	3	2	3	2	2	3	4	2	1	7	1	5	7	2	7	9	3	2	7	2	2	1	3	5	8	2	5	4	2	9	8
2	22	3	2	3	2	2	3	4	2	1	7	1	5	7	2	7	9	3	2	7	2	2	1	3	5	8	2	5	4	2	9	8
3	28	5	4	4	4	4	5	5	3	2	13	2	7	9	3	12	13	4	4	10	3	3	2	4	7	10	4	6	5	2	11	12
4	28	5	4	4	4	4	5	5	3	2	13	2	7	9	3	12	13	4	4	10	3	3	2	4	7	10	4	6	5	2	11	12
5	43	9	7	8	8	7	10	9	7	4	36	4	11	12	6	28	23	10	8	18	7	6	4	7	11	13	10	11	11	5	15	23
6	43	9	7	8	8	7	10	9	7	4	36	4	11	12	6	28	23	10	8	18	7	6	4	7	11	13	10	11	11	5	15	23
7	43	9	7	8	8	7	10	9	7	4	36	4	11	12	6	28	23	10	8	18	7	6	4	7	11	13	10	11	11	5	15	23
8	43	9	7	8	8	7	10	9	7	4	36	4	11	12	6	28	23	10	8	18	7	6	4	7	11	13	10	11	11	5	15	23
9	50	13	11	11	11	11	15	11	11	7	50	6	15	14	9	44	32	15	13	26	11	9	7	9	14	16	16	14	16	8	18	34
10	50	13	11	11	11	11	15	11	11	7	50	6	15	14	9	44	32	15	13	26	11	9	7	9	14	16	16	14	16	8	18	34
11	50	13	11	11	11	11	15	11	11	7	50	6	15	14	9	44	32	15	13	26	11	9	7	9	14	16	16	14	16	8	18	34
12	50	13	11	11	11	11	15	11	11	7	50	6	15	14	9	44	32	15	13	26	11	9	7	9	14	16	16	14	16	8	18	34
13	50	25	23	21	24	23	33	19	25	19	50	12	24	19	17	50	50	34	31	50	27	19	15	16	23	23	41	24	33	18	26	50
14	50	25	23	21	24	23	33	19	25	19	50	12	24	19	17	50	50	34	31	50	27	19	15	16	23	23	41	24	33	18	26	50

VALOR DE Ne - Perfil 215 - 4/215																																
Profundidade (m)	Todos os solos																			Argilas							Siltes					
	Kanai (1966)	Imai e Yoshimura (1970)	Fujiwara(1972)	Ohsaki e Iwasaki (1973)	Imai et al (1975)	Imai (1977)	Fialho Rodrigues (1979)	Seed e Idriss (1981)	Imai e Tonouchi (1982)	Yokoto et al (1991)	Kalteziotis et al (1992)	Athanasopoulos (1995)	Iyisan (1996)	Jafari et al (1997)	Imai (1997)	Kiku et al (2001)	Anbazhagan e Sitharam (2006)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Maheshwari (2008)	Dikmen (2009)	Imai (1977)	JRA (1980)	Lee (1990)	Kalteziotis (1992)	Maugeri e Carruba (1997)	Jafari et al (2002)	Hasancebi e Ulusay (2006)	Dikmen (2009)	Fatehnia (2015)	Lee (1990)	Jafari et al (2002)	Dikmen (2009)
1	22	3	2	3	2	2	3	4	2	1	7	1	5	8	2	7	9	3	2	7	2	2	1	3	5	8	2	5	4	2	9	8
2	22	3	2	3	2	2	3	4	2	1	7	1	5	8	2	7	9	3	2	7	2	2	1	3	5	8	2	5	4	2	9	8
3	28	5	4	4	4	4	5	5	3	2	13	2	7	9	3	12	13	4	4	10	3	3	2	4	7	10	4	6	6	2	11	12
4	28	5	4	4	4	4	5	5	3	2	13	2	7	9	3	12	13	4	4	10	3	3	2	4	7	10	4	6	6	2	11	12
5	42	9	7	7	7	7	10	9	7	4	35	4	11	12	6	27	22	9	8	18	7	6	4	7	11	13	9	10	11	5	15	23
6	42	9	7	7	7	7	10	9	7	4	35	4	11	12	6	27	22	9	8	18	7	6	4	7	11	13	9	10	11	5	15	23
7	42	9	7	7	7	7	10	9	7	4	35	4	11	12	6	27	22	9	8	18	7	6	4	7	11	13	9	10	11	5	15	23
8	42	9	7	7	7	7	10	9	7	4	35	4	11	12	6	27	22	9	8	18	7	6	4	7	11	13	9	10	11	5	15	23
9	50	14	12	11	12	12	17	12	12	8	50	7	16	14	9	49	34	16	14	28	12	10	7	10	15	17	18	15	17	9	19	37
10	50	14	12	11	12	12	17	12	12	8	50	7	16	14	9	49	34	16	14	28	12	10	7	10	15	17	18	15	17	9	19	37
11	50	14	12	11	12	12	17	12	12	8	50	7	16	14	9	49	34	16	14	28	12	10	7	10	15	17	18	15	17	9	19	37
12	50	21	19	17	20	19	27	17	20	14	50	10	21	17	14	50	50	27	25	42	21	16	12	14	20	21	32	21	27	15	23	50
13	50	21	19	17	20	19	27	17	20	14	50	10	21	17	14	50	50	27	25	42	21	16	12	14	20	21	32	21	27	15	23	50
14	50	21	19	17	20	19	27	17	20	14	50	10	21	17	14	50	50	27	25	42	21	16	12	14	20	21	32	21	27	15	23	50

APÊNDICE C – RESULTADOS DE N ESTIMADOS PARA O CAMPO EXPERIMENTAL DO TEXAS

VALOR DE Ne - Perfil N-S																													
Profundidade (m)	Todos os solos																	Areias											
	2	50	19	17	16	18	17	24	15	18	13	50	9	20	17	13	50	46	24	22	38	50	17	27	28	18	19	24	21
4	50	34	33	28	35	33	46	24	36	29	50	17	30	22	24	50	50	49	46	50	50	31	50	50	29	30	37	42	50
6	50	29	27	24	28	27	38	21	30	23	50	14	27	20	20	50	50	40	37	50	50	26	44	45	25	26	33	34	50
8	50	12	10	10	10	10	14	11	10	6	50	6	14	13	8	39	29	13	12	24	39	10	15	16	13	13	16	12	21
10	50	19	17	15	17	17	23	15	17	12	50	9	19	16	13	50	45	23	21	37	50	16	26	27	18	18	23	20	36

VALOR DE Ne - Perfil L-O																													
Profundidade (m)	Todos os solos																Areias												
	2	50	12	10	10	11	10	14	11	10	7	50	6	14	14	8	41	30	14	12	25	40	10	16	17	13	13	17	12
4	50	14	12	11	12	12	16	12	12	8	50	6	15	14	9	48	34	16	14	27	43	12	18	19	14	14	18	14	25
6	50	14	12	11	12	12	16	12	12	8	50	6	15	14	9	47	33	16	14	27	43	12	18	19	14	14	18	14	25
8	39	8	6	6	6	6	9	8	6	4	28	4	10	11	5	23	20	8	7	16	28	6	10	10	9	9	12	7	13
10	50	17	15	14	16	15	21	14	16	11	50	8	18	16	12	50	41	21	19	34	52	15	24	25	17	17	22	18	32

APÊNDICE D – RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE PROJETO OBTIDOS A PARTIR DE VS PARA A QUADRA 215 SUL

Perfil 1/215								Perfil 2/215							
Prof. (m)	Camada	Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)		Prof. (m)	Camada	Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)	
			Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		Teoria da Deformabilidade	Duarte (1997) apud Fernandez (2017)				Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		Teoria da Deformabilidade	Duarte (1997) apud Fernandez (2017)
1	1	24,30	35,14	20,07	0,46	70,73	70,86	1	1	25,77	36,34	20,94	0,45	74,86	75,00
2		24,30	35,14	20,07	0,46	70,73	70,86	2		25,77	36,34	20,94	0,45	74,86	75,00
3	2	38,25	45,39	27,77	0,43	109,13	109,63	3	2	35,19	43,28	26,15	0,43	100,87	101,26
4		38,25	45,39	27,77	0,43	109,13	109,63	4		35,19	43,28	26,15	0,43	100,87	101,26
5	3	55,14	55,75	36,06	0,39	153,03	154,64	5	3	57,99	57,38	37,40	0,38	160,12	162,02
6		55,14	55,75	36,06	0,39	153,03	154,64	6		57,99	57,38	37,40	0,38	160,12	162,02
7		55,14	55,75	36,06	0,39	153,03	154,64	7		57,99	57,38	37,40	0,38	160,12	162,02
8		55,14	55,75	36,06	0,39	153,03	154,64	8		57,99	57,38	37,40	0,38	160,12	162,02
9	4	86,64	71,93	49,84	0,30	225,12	232,46	9	4	75,96	66,72	45,30	0,33	202,40	207,05
10		86,64	71,93	49,84	0,30	225,12	232,46	10		75,96	66,72	45,30	0,33	202,40	207,05
11		86,64	71,93	49,84	0,30	225,12	232,46	11		75,96	66,72	45,30	0,33	202,40	207,05
12		119,82	86,28	62,79	0,49	356,25	356,31	12		75,96	66,72	45,30	0,49	226,60	226,62
13	5	119,82	86,28	62,79	0,49	356,25	356,31	13	5	127,84	89,53	65,81	0,49	379,88	379,94
14		119,82	86,28	62,79	0,49	356,25	356,31	14		127,84	89,53	65,81	0,49	379,88	379,94

Perfil 4/215							
Prof. (m)	Camada	Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)	
			Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		Teoria da Deformabilidade	Duarte (1997) apud Fernandez (2017)
1	1	26,20	36,68	21,20	0,45	76,06	76,21
2		26,20	36,68	21,20	0,45	76,06	76,21
3	2	35,44	43,45	26,28	0,43	101,55	101,94
4		35,44	43,45	26,28	0,43	101,55	101,94
5	3	56,71	56,65	36,80	0,38	156,96	158,73
6		56,71	56,65	36,80	0,38	156,96	158,73
7		56,71	56,65	36,80	0,38	156,96	158,73
8		56,71	56,65	36,80	0,38	156,96	158,73
9	4	80,45	68,95	47,23	0,32	212,18	217,86
10		80,45	68,95	47,23	0,32	212,18	217,86
11		80,45	68,95	47,23	0,32	212,18	217,86
12	5	111,60	82,85	59,64	0,49	332,04	332,08
13		111,60	82,85	59,64	0,49	332,04	332,08
14		111,60	82,85	59,64	0,49	332,04	332,08

APÊNDICE E – RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE PROJETO OBTIDOS A PARTIR DE VS PARA A QUADRA 115 SUL

Perfil 1/115							
Prof. (m)	Camada	Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)	
			Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		Teoria da Deformabilidade	Duarte (1997) apud Fernandez (2017)
1	1	26,84	37,20	21,57	0,45	77,78	77,96
2		26,84	37,20	21,57	0,45	77,78	77,96
3	2	40,36	46,80	28,88	0,42	114,56	115,19
4		40,36	46,80	28,88	0,42	114,56	115,19
5		40,36	46,80	28,88	0,42	114,56	115,19
6		40,36	46,80	28,88	0,42	114,56	115,19
7		40,36	46,80	28,88	0,42	114,56	115,19
8		40,36	46,80	28,88	0,42	114,56	115,19
9	3	75,54	66,72	45,30	0,33	200,25	205,22
10		75,54	66,72	45,30	0,33	200,25	205,22
11		75,54	66,72	45,30	0,33	200,25	205,22
12		75,54	66,72	45,30	0,33	200,25	205,22
13		75,54	66,72	45,30	0,33	200,25	205,22
14		75,54	66,72	45,30	0,33	200,25	205,22

Perfil 2/115							
Prof. (m)	Camada	Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)	
			Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		Teoria da Deformabilidade	Duarte (1997) apud Fernandez (2017)
1	1	24,92	35,65	20,44	0,45	72,42	72,55
2		24,92	35,65	20,44	0,45	72,42	72,55
3	2	40,09	46,62	28,74	0,42	113,85	114,47
4		40,09	46,62	28,74	0,42	113,85	114,47
5		40,09	46,62	28,74	0,42	113,85	114,47
6		40,09	46,62	28,74	0,42	113,85	114,47
7		40,09	46,62	28,74	0,42	113,85	114,47
8		40,09	46,62	28,74	0,42	113,85	114,47
9	3	87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98
10		87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98
11		87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98
12		87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98
13		87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98
14		87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98

Perfil 4/115							
Prof. (m)	Camada	Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)	
			Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		Teoria da Deformabilidade	Duarte (1997) apud Fernandez (2017)
1	1	26,20	36,68	21,20	0,45	75,97	76,14
2		26,20	36,68	21,20	0,45	75,97	76,14
3	2	41,43	47,51	29,43	0,42	117,40	118,09
4		41,43	47,51	29,43	0,42	117,40	118,09
5		41,43	47,51	29,43	0,42	117,40	118,09
6		41,43	47,51	29,43	0,42	117,40	118,09
7		41,43	47,51	29,43	0,42	117,40	118,09
8		41,43	47,51	29,43	0,42	117,40	118,09
9	3	87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98
10		87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98
11		87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98
12		87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98
13		87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98
14		87,33	72,49	50,33	0,29	224,72	232,98

APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS CROSS-HOLE NO CAMPO EXPERIMENTAL DE SÃO CARLOS

Perfil CH1				
Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)
	Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		
82,08	78,69	55,86	0,30	213,40
97,95	87,04	63,50	0,30	254,67
110,11	88,19	64,56	0,30	286,27
116,04	90,88	67,07	0,30	301,72
115,52	89,34	65,63	0,30	300,35
125,27	93,57	69,60	0,30	325,71
164,82	106,80	82,33	0,30	428,53
164,82	106,80	82,33	0,30	428,53
151,76	109,16	84,64	0,30	394,57
143,26	105,63	81,18	0,30	372,49
120,10	95,51	71,43	0,30	312,25

Perfil CH2				
Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)
	Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		
54,16	62,06	41,32	0,30	140,81
72,43	73,26	51,02	0,30	188,32
103,04	84,91	61,53	0,30	267,90
118,25	90,54	66,75	0,30	307,44
146,71	99,93	75,66	0,30	381,45
140,14	104,30	79,89	0,30	364,36

APÊNDICE G – RESULTADOS DOS ENSAIOS DOWN-HOLE NO CAMPO EXPERIMENTAL DE SÃO CARLOS

Perfil DH1					
Prof	Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)
		Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		Poulos (2021)
2,5	153,68	106,69	82,21	0,30	399,56
3	132,66	96,69	72,55	0,30	344,91
3,5	142,94	99,66	75,40	0,30	371,64
4	150,36	101,34	77,02	0,30	390,93
4,5	180,79	116,42	91,85	0,30	470,05
5	165,11	114,54	89,97	0,30	429,29

Perfil DH2					
Prof	Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)
		Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		Poulos (2021)
2,5	172,49	113,96	89,39	0,30	448,48
3	161,27	108,09	83,59	0,30	419,29
3,5	184,13	116,59	92,02	0,30	478,74
4	172,06	109,46	84,93	0,30	447,37
4,5	151,08	108,88	84,36	0,30	392,81
5	151,79	109,17	84,65	0,30	394,65

Perfil DH3					
Prof	Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)
		Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		Poulos (2021)
3	249,81	138,78	114,80	0,30	649,51
4	211,66	123,20	98,69	0,30	550,32
5	149,22	108,11	83,61	0,30	387,97

APÊNDICE H – RESULTADOS DOS ENSAIOS SCPT PARA O CAMPO EXPERIMENTAL DE SÃO CARLOS

Perfil SCPT1					
Prof	Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)
		Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		
1,4	49,75	59,12	38,85	0,30	129,35
2,4	111,65	88,90	65,22	0,30	290,30
3,4	145,63	101,98	77,63	0,30	378,65
4,4	146,68	99,92	75,65	0,30	381,37
5,4	135,95	102,51	78,15	0,30	353,48

Perfil SCPT2					
Prof	Go (MPa)	Su (kPa)		v	E (MPa)
		Agayby e Mayne (2015)	L'Heureux e Long (2016)		
1,4	32,59	46,43	28,59	0,30	84,73
2,4	77,80	72,33	50,19	0,30	202,28
3,4	136,06	98,09	73,90	0,30	353,75
4,4	134,83	95,23	71,17	0,30	350,56
5,4	139,32	103,96	79,55	0,30	362,24