



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE SOLOS DA ASA SUL A PARTIR DE
MÉTODOS DE AQUISIÇÃO SÍSMICA, BRASÍLIA, DISTRITO FEDERAL-BRASIL**

Dissertação de Mestrado nº 120

BRUNO PICININ FERNÁNDEZ

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Peres Rocha

Brasília – DF
2017

BRUNO PICININ FERNÁNDEZ

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE SOLOS DA ASA SUL A PARTIR DE
MÉTODOS DE AQUISIÇÃO SÍSMICA, BRASÍLIA, DISTRITO FEDERAL-BRASIL**

Dissertação nº 120

Dissertação de Mestrado realizada no âmbito do Programa de Geociências Aplicadas da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre.

Área de Concentração: Geofísica Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Peres Rocha.

Brasília – DF

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

FERNÁNDEZ, BRUNO PICININ.

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE SOLOS DA ASA SUL A PARTIR DE MÉTODOS DE AQUISIÇÃO SÍSMICA, BRASÍLIA, DISTRITO FEDERAL-BRASIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOFÍSICA APLICADA. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS. BRASÍLIA – DF.

1. SOLOS.
2. GEOTECNIA.
3. SÍSMICA DE REFRAÇÃO
4. 4. MASW.
5. 5. PROJETO DE ENGENHARIA.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA:

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.

Bruno Picinin Fernández

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE SOLOS DA ASA SUL A PARTIR DE
MÉTODOS DE AQUISIÇÃO SÍSMICA, BRASÍLIA, DISTRITO FEDERAL-BRASIL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – Folha de Aprovação

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Peres Rocha

Instituição: IG/UnB

Assinatura:.....

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

Instituição: IG/UnB

Assinatura:.....

Prof. Dr. Newton Moreira de Souza

Instituição: FT/UnB

Assinatura:.....

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar agradeço a Deus por permitir que eu finalizasse esta etapa de minha vida profissional.

Ao professor Dr. Marcelo Peres Rocha, por todo apoio técnico e, principalmente, pela paciência com um aluno que precisou conciliar trabalho e família aos estudos de pós-graduação.

Aos colegas do SIS, principalmente, ao Bruno Nascimento, pelo auxílio nos levantamentos de campo e processamento dos dados.

Aos colegas de trabalho, pelo apoio durante esses anos de atividade acadêmica, viabilizando a minha participação no Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da UnB.

A minha mãe (*in memoriam*) e meu Pai, que me ensinaram a ter fé, paciência e persistência, qualidades sem as quais não seria possível ter superado esse desafio.

Aos meus filhos, pela paciência com o papai, que sentiram de muito perto meus momentos de ansiedade e as minhas ausências nos finais de semana, no futebol, nas noites passadas sem mim, por eu estar em bibliotecas e aonde fosse possível ter concentração para dar conta da pesquisa aqui formalizada.

E, especialmente, à minha esposa, companheira incansável de todas as batalhas do dia a dia, grande incentivadora desse projeto; à minha Magrelinha agradeço por acreditar em mim.

RESUMO

A utilização da sismica em projetos de engenharia decorre preferencialmente da identificação dos refletores ou camadas superficiais do solo. Nesse contexto, o presente trabalho visou a caracterização geológica e geotécnica de duas seções de solo, na Asa Sul de Brasília, Distrito Federal, a partir de ensaios de Refração Sísmica e de *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW). Ademais a metodologia usada mediu, em cada seção geofísica, a velocidade das ondas P (V_p) e S (V_s), a densidade (ρ); o que proporcionou o cálculo do módulo de Young (E), o módulo de cisalhamento (G), o coeficiente de Poisson (ν) e o coeficiente volumétrico (K). A partir desses dados foram caracterizados os solos sondados quanto à textura, consistência, escavabilidade e saturação. Essa caracterização foi confrontada, então, com dados existentes no local provenientes de sondagens percussivas e ensaios do tipo *Standard Penetration Test* (SPT), tendo sido verificada boa correlação entre os dados indiretos (geofísicos) e diretos (sondagens mecânicas). Destaca-se, que os valores dos módulos elásticos estimados, conforme metodologia apresentada na presente pesquisa, poderiam ser usados, ainda, no cálculo de fundações e no dimensionamento de equipamentos de escavação para execução de uma obra de infraestrutura até a profundidade de 13 metros na seção da SQS 215 e de 14 metros na seção da SQS 115. Acredita-se que a aplicação da metodologia para estimar os parâmetros elásticos em solos da Asa Sul incentive o maior uso da sismica em estudos prévios para elaboração de projetos de infraestruturas a serem desenvolvidos neste bairro e demais regiões do Distrito Federal.

ABSTRACT

The use of seismic in engineering for infrastructure projects allows the identification of reflectors or surface layers of the soil. In this context, the present study aimed to the geological and geotechnical characterization of two sections of soil pertaining to Asa Sul region in Brasilia, Federal District, using data obtained in tests of Seismic Refraction and MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). The methodology also allowed to measure, in each section, the speed of the P waves (V_p) and S (V_s), the density (ρ); the calculation of the Young's and shear modules (G), the Poisson (ν) and the volumetric coefficients (K). These data were the base to characterize the collected soil samples in relation to texture, consistency, digging and saturation properties. The results were also confronted with existing data from surveys and tests of percussive type SPT (Standard Penetration Test) with good correlation between the indirect data (geophysics) and direct (mechanical prospecting). Important to note that the values of elastic modules estimated by the methodology of this research, allow the calculation of foundations and excavation equipment for execution of infrastructure works in the sections surveyed within a range of 13 and 14 meters in depth. The application of the methodology for estimating elastic parameters in soils of the researched area can encourage the greater use of refractive seismic methodologies in infrastructure projects in other areas of the Federal District.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	4
1.1. LOCALIZAÇÃO	4
1.1.1. GEOLOGIA	5
1.1.2. GEOMORFOLOGIA	12
1.1.3. SOLOS.....	14
1.1.4. CLIMA E REGIME PLUVIOMÉTRICO	16
1.1.5. HIDROGEOLOGIA	18
1.1.6. CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA.....	20
1.1.7. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	22
2. REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1. PROPRIEDADES DOS SOLOS	23
2.2. COMPORTAMENTO ELÁSTICO DOS SOLOS	30
2.2.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	32
2.2.2. COEFICIENTE DE <i>POISSON</i>	33
2.2.3. MÓDULO DE CISALHAMENTO	34
2.2.4. MÓDULO VOLUMÉTRICO	35
2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	35
2.3.1. DETERMINAÇÃO DA TEXTURA	36
2.3.2. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA	37
2.3.3. DETERMINAÇÃO DA ESCAVABILIDADE.....	39
2.3.4. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS ELÁSTICOS	39
2.3.4.1. ENSAIOS DE CAMPO	40
2.4. MÉTODOS SÍSMICOS DE SUPERFÍCIE	44
2.4.1. MÉTODO: SÍSMICA DE REFRAÇÃO	49
2.4.2. MASW	56
3. METODOLOGIA.....	64
3.1. PESQUISA EXPERIMENTAL.....	64
3.1.1. PROCESSAMENTO E INVERSÃO DA SÍSMICA DE REFRAÇÃO	70
3.1.2. PROCESSAMENTO E INVERSÃO DO MASW	73
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1. INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA COM DADOS COLETADOS EM SONDAGENS PERCURSIVAS E ENSAIOS SPT	74

4.2. INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA COM DADOS SÍSMICOS ..	82
4.2.1. RESULTADOS - MÉTODO DE REFRAÇÃO SÍSMICA	86
4.2.2. RESULTADOS – MASW	89
4.2.3. RESULTADOS – CÁLCULO DOS MÓDULOS ELÁSTICOS.....	96
4.3. INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA A PARTIR DA ANÁLISE INTEGRADA	103
5. CONCLUSÕES.....	108
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1: Localização das áreas nas quais serão realizadas as aquisições sísmicas.	4
Figura 1. 2: Coluna estratigráfica do Grupo Paranoá, definida na área-tipo de São João d'Aliança – Alto Paraíso de Goiás (Faria, 1995).	6
Figura 1. 3: Recomposição litoestratigráfica do Distrito Federal (Silva & Campos, 1999).	7
Figura 1. 4: Mapa Geológico do Distrito Federal (Modificado de Freitas-Silva & Campos, 1999 com informações atualizadas com os dados de Campos, 2013). Em destaque pode ser observada a posição da Asa Sul de Brasília, local onde foram realizados os levantamentos geofísicos da presente pesquisa.	10
Figura 1. 5: Perfil geológico (sul/norte) da Asa Sul (modificado de Blanco, 1995).	11
Figura 1. 6: Macrounidades geomorfológicas do Distrito Federal (Modificado de Novais Pinto, 1993).	13
Figura 1. 7: Modelo Digital do Terreno do território do Distrito Federal (De Souza Martins <i>et al.</i> , 2008).	14
Figura 1. 8: Frente de escavação do túnel de metro da Asa Sul (fotos do acervo pessoal do Engenheiro Arnaldo Ferreira da Costa): A) exposição da interface solo-rocha da unidade Ardósia; B) exposição de argila porosa.	15
Figura 1. 9: Precipitação pluviométrica média mensal de Brasília entre 1963 e 1990 (INMET, 2015).	17
Figura 1. 10: Precipitação pluviométrica mensal de Brasília em 2015 (INMET, 2017).	18
Figura 1. 11: Contextualização Geológico-Geotécnica da área de estudo, Asa Sul de Brasília-DF.	21
Figura 2. 1: Exemplo de triângulo textural (Lemos e Santos, 1996).	26
Figura 2. 2: Limites de Atterberg (Pinto, 2006).	27
Figura 2. 3: Estados e limites de consistência (Gonçalves <i>et al.</i> , 2014).	28
Figura 2. 4: Relação entre forças e deslocamentos, com tensões e deformações num corpo e a forma de as descrever (Maranha das Neves, 2001).	31
Figura 2. 5: Cilindro submetido a deformação axial por aplicação da força F (Kulhánek, 1993).	32
Figura 2. 6: Cilindro submetido a extensão longitudinal e contração lateral por aplicação da força F (Kulhánek, 1993).	33
Figura 2. 7: Corpo tridimensional submetido a uma tensão cisalhante em sua face superior sofre deformação cisalhante (Kulhánek, 1993).	34
Figura 2. 8: Corpo tridimensional submetido a uma pressão hidrostática sofrendo deformação volumétrica (Kulhánek, 1993).	35
Figura 2. 9: Exemplo de uma curva granulométrica (Pinto, 2006).	36
Figura 2. 10: Desenho esquemático do ensaio SPT (Penna, 2010).	39
Figura 2. 11: Configuração básica de uma linha de aquisição sísmica de superfície (Lopes, 2005).	42
Figura 2. 12: Ondas sísmicas produzidas por um terremoto (http://www.educando.edu.do/articulos/estudiante/los-terremotos , 2016).	44
Figura 2. 13: Diferentes formas de propagação das ondas sísmicas (http://mybrainsociety.blogspot.com.br/2015/12/ondas-sismicas.html).	45
Figura 2. 14: Propagação teórica de uma onda sísmica em um meio (Kearey <i>et al.</i> , 2009).	46
Figura 2. 15: Trajetórias dos raios incidente, transmitido e refletido.	47
Figura 2. 16: Trajetórias dos raios direto, refletido e refratado criticamente (Kearey <i>et al.</i> , 2009).	48
Figura 2. 17: Curvas do tempo de percurso para os raios, direto, refletido e refratado (Kearey <i>et al.</i> , 2009).	48

Figura 2. 18: Trajetória dos raios direto (vermelho) e refratado (azul), da fonte A ao receptor D, onde $V_1 < V_2$ e L é a projeção dos segmentos AB e CD na superfície (Kearey <i>et al.</i> , 2009 <i>apud</i> Nogueira, 2014).....	51
Figura 2. 19: Princípio básico da sísmica de refração no modelo de duas camadas (Fonte: Giacheti <i>et al.</i> , 2006).	52
Figura 2. 20: Modelo de duas camadas com interface inclinada em relação a superfície e velocidade $V_2 > V_1$. a) Curvas tempo versus distância para os dois sentidos de mergulho. b) Trajetória dos raios refratados (Kearey <i>et al.</i> , 2009, <i>apud</i> Nogueira, 2014).....	54
Figura 2. 21: Propagação de raio sísmico e sua refração em uma interface irregular (Kearey <i>et al.</i> , 2009, <i>apud</i> Nogueira, 2014).....	55
Figura 2. 22: Exemplo de camada cega: a) gráfico tempo versus distância. b) propagação dos raios direto e refratado. (Kearey <i>et al.</i> , 2009).	56
Figura 2. 23: Exemplo de camada oculta: a) gráfico tempo versus distância. b) propagação dos raios direto e refratado. (Kearey <i>et al.</i> , 2009).	56
Figura 2. 24: Os três passos principais do método de ondas superficiais (Strobbia, 2003).....	57
Figura 2. 25: Tempo de chegadas dos diferentes tipos de onda em um sismograma (Tulane, 2012).	58
Figura 2. 26: Propagação das ondas Rayleigh: A) propagação em 3 dimensões (Strobbia, 2003). B) movimentação das partículas pela passagem da onda Rayleigh (Lay e Wallace, 1995).	58
Figura 2. 27: Relação entre a velocidade de propagação das ondas de corpo e a onda Rayleigh (Richart <i>et al.</i> (1970); Strobbia 2003a <i>apud</i> Lopes, 2005).	59
Figura 2. 28: a) Penetração de distintos comprimentos de ondas Rayleigh (Geovision, 2015). b) Propagação de diferentes comprimentos de onda (Hayashi, 2003).....	60
Figura 2. 29: A) Ondas Rayleigh em um meio homogêneo, a velocidade de fase constante. B) Ondas Rayleigh em um meio estratificado, diferentes comprimentos de onda amostram diferentes materiais e geram diferentes velocidades de fase (Strobbia, 2003).	60
Figura 3. 1: Equipamentos utilizados no trabalho de campo.	65
Figura 3. 2: Geometria da linha sísmica da 215 Sul.	68
Figura 3. 3: Geometria da linha sísmica da 115 Sul.	68
Figura 3. 4: Procedimento considerado para definição da posição dos perfis 1D produzidos com os sismogramas gerados na 215.	69
Figura 3. 5: Procedimento considerado para definição da posição dos perfis 1D produzidos com os sismogramas gerados na 115.	70
Figura 3. 6: Exemplo de marcação dos picks (em vermelho).	71
Figura 3. 7: Exemplo de gráfico tempo versus distância com duas camadas identificadas, uma inclinação marcada em vermelho e a outra de verde.	72
Figura 3. 8: Exemplo de um modelo 2D.....	72
Figura 3. 9: Resumo do processamento de dados pelo método MASW.	73
Figura 4. 1: Distribuição geográfica dos furos de sondagem analisados no trabalho de Oliveira, 1996.....	75
Figura 4. 2: Croqui com localização dos furos de sondagem utilizados para construção da seção geológico-geotécnica da 215 Sul.	77
Figura 4. 3: Desenho esquemático com a descrição dos furos de sondagem IN-004-2 e IN-003-6.....	77
Figura 4. 4: Croqui com localização dos furos de sondagem utilizados para construção da seção geológico-geotécnica da 115 Sul.	78
Figura 4. 5: Desenho esquemático com a descrição dos furos de sondagem SD-007-4, SD-007-3 e SD-007-2.	78
Figura 4. 6: Seção geotécnica da 215 Sul quanto à classificação textural do solo.	79
Figura 4. 7: Seção geotécnica da 115 Sul quanto à classificação textural do solo.	80
Figura 4. 8: Seção geotécnica da 215 Sul quanto à consistência do solo.	81
Figura 4. 9: Seção geotécnica da 115 Sul quanto à consistência do solo.	81

Figura 4. 10: Croqui com localização da linha sísmica realizada na 215 Sul.....	82
Figura 4. 11: Croqui com localização da linha sísmica realizada na 115 Sul.....	83
Figura 4. 12: Sismogramas produzidos durante a sondagem geofísica na SQS 215.....	84
Figura 4. 13: Sismogramas produzidos durante a sondagem geofísica na SQS 115.....	85
Figura 4. 14: Modelo de velocidades SQS 215: A) gráfico tempo versus distância. B) perfil de velocidade sísmica, onda P.....	87
Figura 4. 15: Modelo de velocidades SQS 115: A) gráfico tempo versus distância. B) perfil de velocidade sísmica, onda P.....	88
Figura 4. 16: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D nº 1/215. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas no perfil 1D.....	90
Figura 4. 17: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D nº 2/215. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas no perfil 1D.....	90
Figura 4. 18: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D nº 4/215. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas e o perfil 1D.....	90
Figura 4. 19: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D nº 1/115. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas e o perfil 1D.....	91
Figura 4. 20: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D nº 2/115. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas e o perfil 1D.....	91
Figura 4. 21: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D nº 4/115. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas no perfil 1D.....	91
Figura 4. 22: Seção 2D de velocidades mínimas (V_{smin}) da SQS 215, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.....	92
Figura 4. 23: Seção 2D de velocidades mínimas (V_{smin}) da SQS 115, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.....	93
Figura 4. 24: Seção 2D de velocidades máximas (V_{smax}) da SQS 215, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.....	93
Figura 4. 25: Seção 2D de velocidades máximas (V_{smax}) da SQS 115, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.....	94
Figura 4. 26: Apresenta a seção contendo a distribuição dos valores dos parâmetros elásticos calculados na SQS 215.....	99
Figura 4. 27: Apresenta a seção contendo a distribuição dos valores dos parâmetros elásticos calculados na SQS 115.....	99
Figura 4. 28: Seção geológico-geotécnica da 215 Sul, construída com dados sísmicos.....	102
Figura 4. 29: Seção geológico-geotécnica da 115 Sul, construída com dados sísmicos.....	102
Figura 4. 30: Seções Geológico-geotécnicas: A) seção da SQS 215 construída com dados de sondagem direta; B) seção da SQS 215 construída com dados de sondagens geofísicas; C) seção da SQS 115 construída com dados de sondagem direta; e D) seção da SQS 215 construída com dados de sondagens geofísicas.....	105
Figura 4. 31: Seção Geológico-geotécnica da 215 Sul executada a partir da integração de dados obtidos pelos métodos diretos e indiretos.....	106
Figura 4. 32: Seção Geológico-geotécnica da 115 Sul executada a partir da integração de dados obtidos pelos métodos diretos e indiretos.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. 1: Descrição das litologias do grupo Paranoá no Distrito Federal do topo para a base da sequência (Freitas-Silva & Campos, 1999; ZEE RIDE, 2009; Campos, 2013).	8
Tabela 1. 2: Resumo da classificação dos domínios aquíferos dos Distrito Federal, com as respectivas vazões médias (Modificado de Freitas-Silva & Campos, 1999 <i>apud</i> Campos, 2004).	19
Tabela 2. 1: Principais índices que indicam o estado dos solos (Pinto, 2006).	24
Tabela 2. 2: Frações de solos e suas faixas granulométricas (ABNT NBR 6502:1995).	25
Tabela 2. 3: Faixas de consistência de solos argilosos (Terzagui, 1948 <i>apud</i> Pinto, 2006).	28
Tabela 2. 4: Valores típicos de e_{min} e e_{max} (Gonçalves <i>et al.</i> , 2014).	29
Tabela 2. 5: Classificação das areias segundo a compactidade relativa (Terzaghi, 1948 <i>apud</i> Pinto, 2006).	29
Tabela 2. 6: Faixas de atividade de solos argilosos (Skempton, 1952 <i>apud</i> Mello e Teixeira, 1967).	29
Tabela 2. 7: Sensibilidade de solos argilosos (Skempton & Northey, 1952).	30
Tabela 2. 8: Classificação das argilas segundo a consistência (Terzagui & Peck, 1948).	38
Tabela 2. 9: Consistência de argilas em função do NSPT (ABNT NBR 7250:1982).	38
Tabela 2. 10: Exemplo de relações entre N e V_s propostas por diferentes autores (Lopes, 2005).	40
Tabela 2. 11: Exemplos de relações entre q_c e V_s (Lopes, 2005).	41
Tabela 2. 12: Ensaio para a determinação das propriedades dinâmicas dos solos (Pitilakis & Anastasiadis, 1998).	43
Tabela 3. 1: Tabela de parâmetros recomendados para aquisição ativa (Park <i>et al.</i> , 2002),	66
Tabela 4. 1: Dados utilizados para avaliação geotécnica do solo, extraído da Dissertação de Oliveira, 1996.	76
Tabela 4. 2: Correlação entre a velocidade de propagação de ondas longitudinais (V_p) em diferentes materiais (Souza <i>et al.</i> , 1998).	89
Tabela 4. 3: Correlação entre a V_p e escavabilidade do maciço (Redaelli e Cerello, 1998).	89
Tabela 4. 4: Resumo dos resultados numéricos obtidos pela execução do MASW.	92
Tabela 4. 5: Tipos de terreno para a consideração da influência das condições locais na ação sísmica (NP EN 1998-1: 2010).	95
Tabela 4. 6: Resultados de $V_{s,30}$ calculados segundo a NP EN 1998-1: 2010.	96
Tabela 4. 7: Apresenta o processo de cálculo dos parâmetros elásticos.	97
Tabela 4. 8 Apresenta o resultado do cálculo dos parâmetros elásticos do Perfil nº 1/215.	98
Tabela 4. 9: Apresenta o resultado do cálculo dos parâmetros elásticos do Perfil nº 1/115.	98
Tabela 4. 10: Relação entre consistência e resistência a partir de verificação no campo (Simons e Menzies, 1981).	100
Tabela 4. 11: Tipos de solos e sua correlação com a Razão de <i>Poisson</i> (Teixeira e Godoy, 1996).	101
Tabela 4. 12: Quadro esquemático para comparação dos dados adquiridos pelos métodos diretos e indiretos na pesquisa.	104

INTRODUÇÃO

A investigação dos solos e das rochas é fundamental na elaboração de projetos de engenharia seguros e econômicos, sendo etapa obrigatória para o estabelecimento do equilíbrio físico entre o meio e a obra que se pretende implantar.

Em geral, a investigação geológico-geotécnica é iniciada nos estudos prévios à implantação de uma obra, estendendo-se até a fase de projeto básico. Entretanto, deve ser destacado, que às vezes, dependendo da complexidade da obra e do meio geológico, os estudos do subsolo são requeridos durante a realização do projeto executivo e ao longo da própria execução de uma obra.

Segundo Giacheti et al. (2006), a investigação do subsolo é feita para definir o perfil estratigráfico, o que inclui identificar as camadas, suas espessuras e os diferentes tipos de solos. Além disso, a posição do nível d'água e os parâmetros elásticos dos materiais devem ser determinados. Para tanto, ensaios de campo e de laboratório são utilizados, sendo esses classificados em dois tipos principais: métodos diretos e indiretos.

Nos métodos diretos, a observação direta do subsolo é realizada por meio de amostras coletadas ao longo de uma perfuração e pela medição direta de propriedades *in situ* (escavações e sondagens mecânicas), apoiados ou não por ensaios laboratoriais. Nos métodos indiretos, as propriedades dos solos são estimadas sem a alteração das propriedades físicas dos materiais amostrados, por esse motivo são denominados também de métodos não invasivos. O mais conhecido são o sensoriamento remoto e a geofísica.

Os métodos de exploração geofísica constituem um conjunto de técnicas de aquisição indireta de dados, em geral, pela propagação de ondas pelos materiais e estruturas que compõem o solo e o subsolo para fins de engenharia ou outros propósitos. Essas técnicas são subdivididas em métodos ativos e passivos (Souza *et al.*, 1998).

Métodos ativos são aqueles que utilizam uma fonte controlada para propagação de um sinal no meio a ser investigado, citando como exemplos mais conhecidos a sísmica de reflexão e refração; métodos elétricos e eletromagnéticos; perfilagem de poços e georadar (GPR).

Os métodos passivos medem a energia emanada pelo meio natural ou por uma fonte não controlada. Citam-se, como exemplo, os métodos: potencial elétrico, gravimetria, magnetometria, sísmica passiva e magneto telúrico como os mais conhecidos.

Kearey (2009), afirma que os métodos geofísicos, embora algumas vezes passíveis de grandes ambiguidades e incertezas na interpretação, proporcionam um meio relativamente rápido e barato de se obter informações geológicas e geotécnicas de uma área.

Souza (2012) discutiu as limitações e as potencialidades de diferentes métodos geofísicos aplicados a projetos de geotecnia, destacando a importância de que os resultados

garantam a plena compreensão dos produtos finais aplicados à engenharia. Logo, a consolidação da geofísica como um método mais usual nas primeiras etapas de levantamento de dados geológicos e geotécnicos em projetos de engenharia reside na capacidade da delimitação clara de suas ambiguidades e incertezas.

Diversas são as aplicações potenciais do uso da geofísica em projetos de engenharia destacando-se as cubagens em escavações, a identificação do nível d'água e topo rochoso, localização de objetos enterrados (tanques, estruturas de drenagem, etc.), mudança de litologia, entre outras.

Na engenharia, a sísmica é utilizada principalmente para identificação das espessuras e profundidade das camadas de solo e rocha, por meio do método de Refração Sísmica. Entretanto, existem muitas outras técnicas de aquisição e processamento de dados sísmicos que tem, em conjunto, possibilitado a obtenção diversos outros parâmetros, dos quais se pode, inclusive, calcular os módulos elásticos de solos e rochas.

Dessa forma, deve ser dado destaque ao método conhecido como *Spectral Analysis of Surface Waves* (SASW) e sua evolução denominado de *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW). Ambos se baseiam nas características dispersivas das ondas de superfície Rayleigh ao percorrer um meio estratificado, e tem como produto perfis de velocidade da onda S em profundidade.

Muitos são os trabalhos e as pesquisas apresentando o uso da sísmica como solução em projetos de engenharia, várias delas em importantes cidades, nas quais a densidade de equipamentos urbanos torna o uso de ferramentas de aquisição não invasivas pré-requisito relevante para viabilizar empreendimentos e infraestruturas. A seguir, alguns exemplos de pesquisas utilizando métodos sísmicos com aplicações na engenharia:

- em Portugal, Lopes et al. (2004), utilizaram o Método MASW para investigar o solo do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto (FEUP), com objetivo de correlacionar os perfis de velocidade (Vs) obtidos em ensaios SPT existentes no local;
- a pesquisa realizada por Martín e Gorosabel (2006) discutiu as condições da aplicação das experiências e dos resultados obtidos em campanhas de caracterização geofísica do terreno para ampliação da rede de metrô de Madri (Espanha), no ano de 2005, utilizando sísmica refração;
- em São Paulo, foi realizada investigação de solos no Campus Experimental da Universidade de São Paulo (USP), por Apaza e Barros (2010), por meio da Técnica SASW, com a finalidade de estimar o cisalhamento máximo ($G_{máx}$) do terreno;
- localmente, cita-se a pesquisa desenvolvida por Seimetz (2012), que consistiu na utilização de dados de sísmica de refração e eletrorresistividade para mapear a estrutura geológica de subsolo da Asa Norte de Brasília, Distrito Federal.

OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem como principal objetivo estudar o potencial uso dos métodos de Refração Sísmica e MASW para levantamento de parâmetros, que permitam o cálculo dos módulos elásticos em solos de áreas urbanas no Distrito Federal.

Além disso, têm-se como objetivos específicos:

- proposição de um procedimento básico de campo para a aquisição de dados de refração sísmica e MASW com a finalidade de levantar parâmetros geotécnicos, ajustado às características do meio urbano e solos de Brasília;
- integração dos resultados dos métodos sísmicos para o cálculo dos parâmetros elásticos; e
- interpretação geológico-geotécnica das seções geofísicas realizadas pela integração dos dados adquiridos em campo, com aqueles disponíveis na literatura especializada, como dissertações, teses e outras pesquisas.

1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

1.1. LOCALIZAÇÃO

A área delimitada como de estudo é a região da Asa Sul, bairro integrante do Plano Piloto de Brasília, Distrito Federal, mais especificamente nas áreas verdes das Superquadras Sul 115 e 215 (**Figuras 1.1**).

Os principais critérios usados para a escolha da área de estudo foram:

- o conjunto de dados geológico-geotécnicos disponíveis;
- a proximidade com o Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), buscando facilitar a logística para aquisição de dados sísmicos; e
- áreas verdes para a execução das linhas de aquisição sísmica, com o comprimento mínimo para alcance de profundidades em torno de 15 metros, e solo apto à cravação dos geofones.

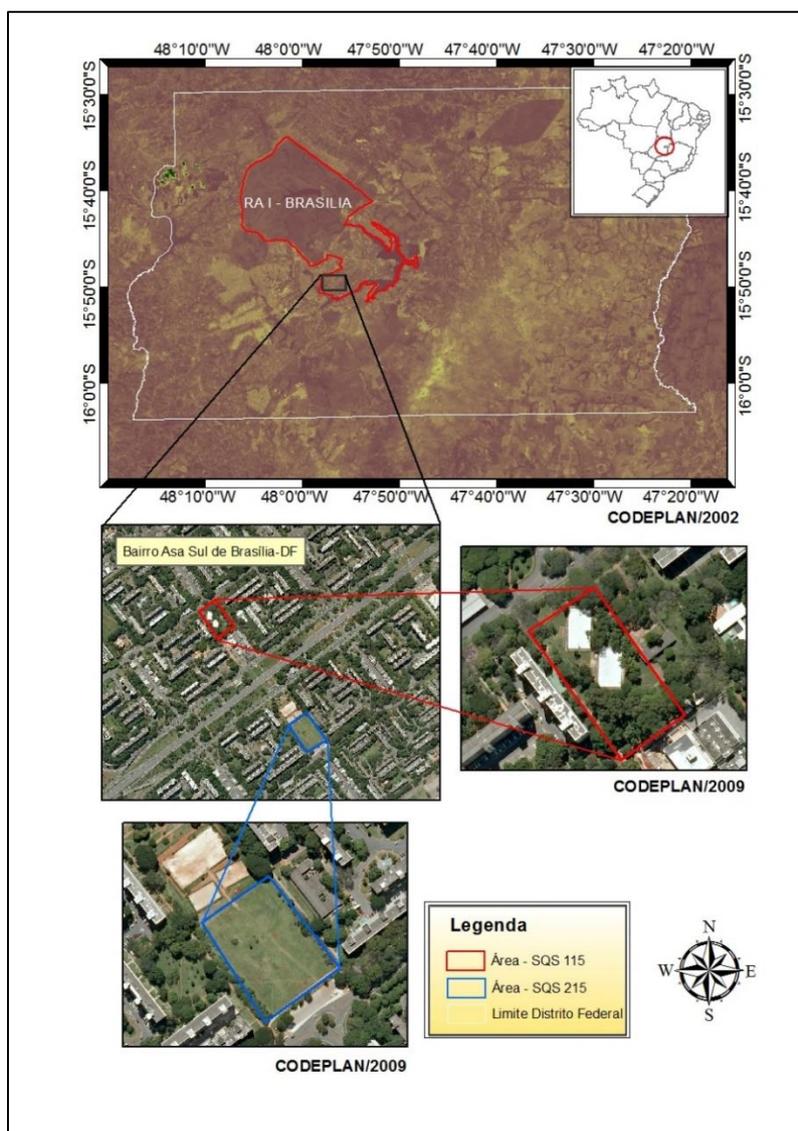


Figura 1. 1: Localização das áreas nas quais foram realizadas as aquisições sísmicas.

O presente tópico foi organizado a partir da apresentação da geologia regional e local, seguida da descrição das principais formas de relevo e coberturas (solos/saprólitos), regime climático, comportamento hidrológico e hidrogeológico local, finalizando com a contextualização do atual uso e ocupação da área. A partir da análise conjunta desses dados é possível definir as características gerais do solo que será amostrado por meio das seções sísmicas.

1.1.1.GEOLOGIA

A área de estudo está posicionada regionalmente na Faixa Brasília (Almeida, 1967a, 1967b; Marini *et al.*, 1981), Província do Tocantins, situada entre os Cratons Amazônico e do São Francisco. A Faixa Brasília é subdividida em duas porções, por meio da Sintaxe dos Pirineus (Araújo Filho, 2008), uma setentrional e outra meridional. Essa última é composta por depósitos sedimentares e rochas vulcânicas submetidos a variados graus de metamorfismo, constituindo os grupos litoestratigráficos Araxá, Canastra, Bambuí e Paranoá (Barbosa, 1963; Dardenne, 1978).

A área de estudo está situada integralmente sob rochas e sedimentos do Grupo Paranoá. Esse grupo foi dividido por Faria (1995) em 11 unidades litológicas, das quais 6 identificadas no Distrito Federal por Freitas-Silva & Campos (1999), a saber: Unidade Psamo-pelito-carbonatada (PPC), Unidade Metarritmito Argiloso (R₄), Unidade Quartzito Médio (Q₃), Unidade Metarritmito Arenoso (R₃), Unidade Ardósia (A) e Unidade Metassiltito Argiloso (S). Essas unidades foram posteriormente denominadas na forma descrita por Campos (2013), conforme lista apresentada a seguir:

- Unidade Psamo-pelito-carbonatada (PPC) atualmente denominada de Formação Córrego Barreiro;
- Unidade Metarritmito Argiloso (R₄) atualmente denominada de Formação Córrego Sansão;
- Unidade Quartzito Médio (Q₃) atualmente denominada de Formação Córrego Contagem;
- Unidade Metarritmito Arenoso (R₃) atualmente denominada de Formação Serra da Meia Noite;
- Unidade Ardósia (A) atualmente denominada de Formação Córrego do Torto;
- Unidade Metassiltito Argiloso (S) atualmente denominada de Córrego Ribeirão Piçarrão.

As colunas estratigráficas das unidades descritas por Faria (1995) e por Freitas-Silva & Campo (1999) podem ser observadas respectivamente nas **Figuras 1.2 e 1.3**, já as 6 litologias identificadas no Distrito Federal estão descritas a na **Tabela 1.1**.

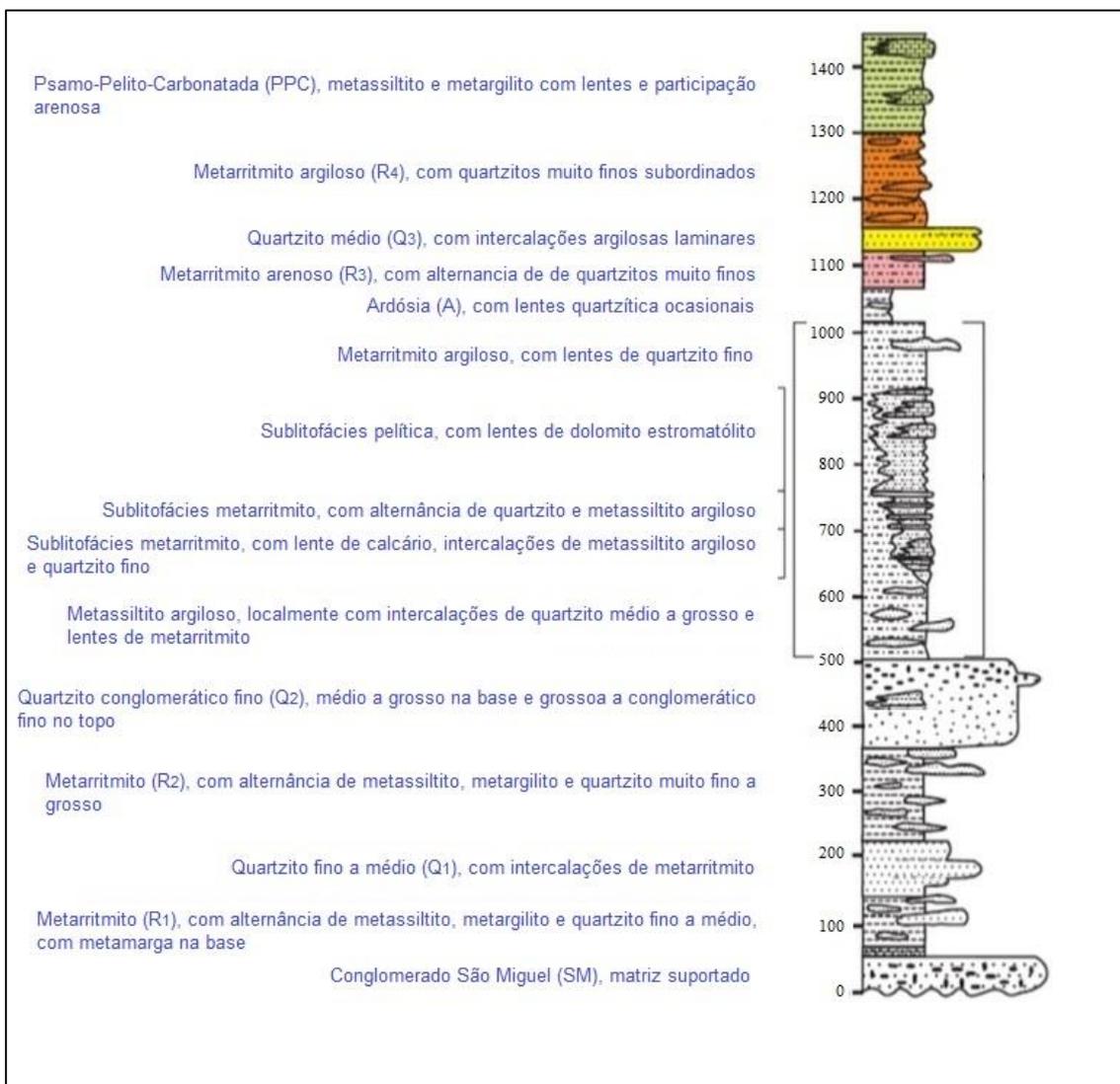


Figura 1. 2: Coluna estratigráfica do Grupo Paranoá, definida na área-tipo de São João d'Aliança – Alto Paraíso de Goiás (Faria, 1995).

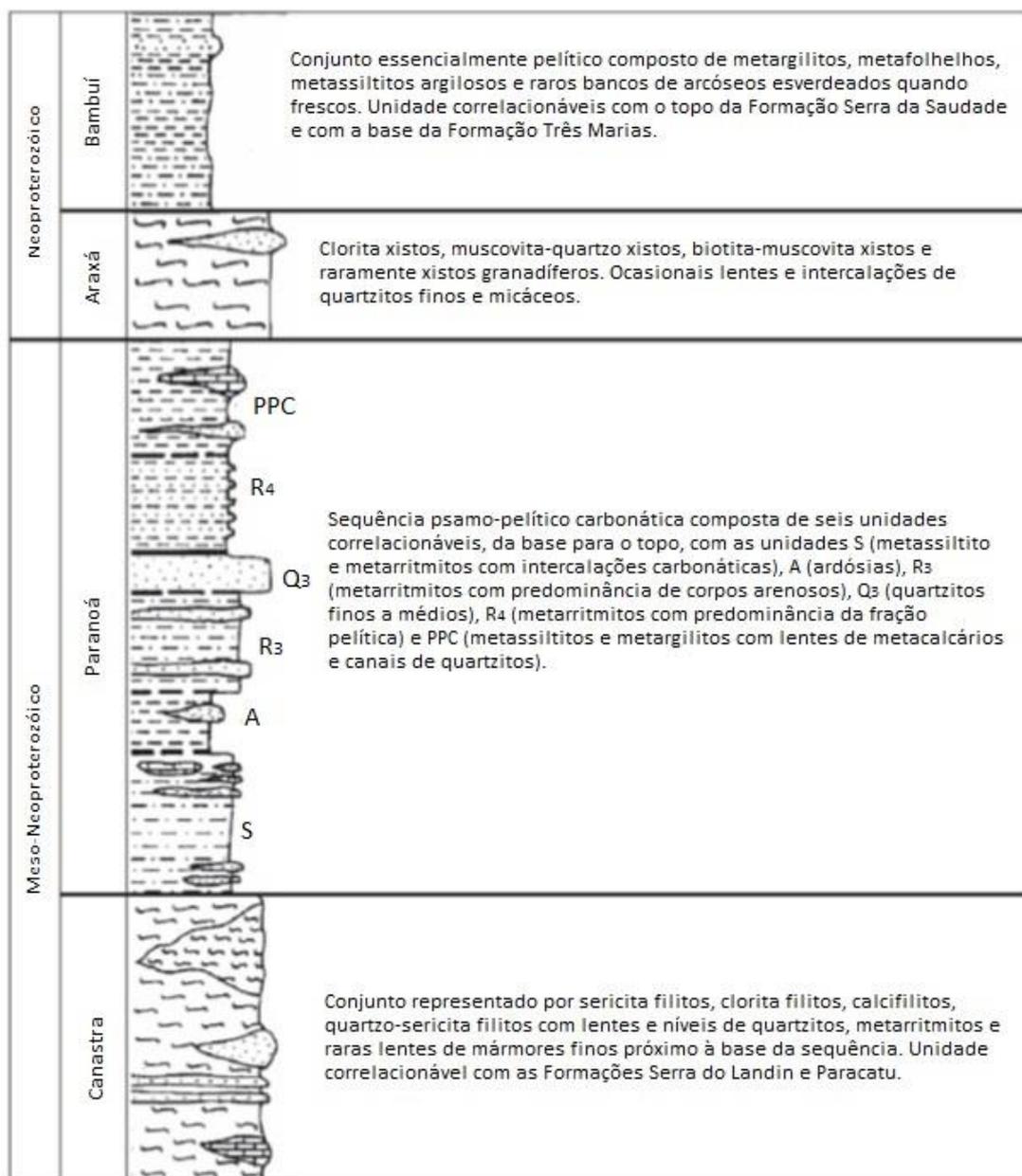


Figura 1. 3: Recomposição litoestratigráfica do Distrito Federal (Silva & Campos, 1999).

No Mapa Geológico do Distrito Federal, publicado por Freitas-Silva & Campos (1999), observa-se a predominância das rochas do grupo Paranoá, sendo mapeados na borda leste rochas do grupo Bambuú, no centro-leste, acompanhando a bacia do rio São Bartolomeu e extremo norte, rochas do grupo Canastra e no sudoeste rochas do grupo Araxá (Figura 1.4).

Tabela 1. 1: Descrição das litologias do grupo Paranoá no Distrito Federal do topo para a base da sequência (Freitas-Silva & Campos, 1999; ZEE RIDE, 2009 1999 com informações atualizadas com os dados de Campos, 2013).

Formação	Espessura (Área Tipo)	Descrição
Córrego Barreiro	120 a 150 metros	Metalamitos siltosos de coloração cinza a prateado, muito laminados, podendo mostrar foliações com abundante presença de filossilicatos. Além dos metapelitos (85%), ocorrem rochas carbonáticas e quartzíticas. Refere-se à unidade geológica anteriormente denominada de PPC.
Córrego Sansão	100 a 150 metros	Metarritmito homogêneo com intercalações centimétricas regulares de metassiltitos, Metalamitos e quartzitos finos de coloração cinza, rosa, amarelada e avermelhada, em função do grau de intemperismo. A maior proporção de material pelítico e a pequena espessura dos níveis arenosos caracteriza essa unidade em escala de afloramento e a distingue dos demais ritmos do grupo Paranoá. Exposição no Distrito Federal: junto as bordas do domo Brasília e na porção externa do domo Sobradinho. Refere-se à unidade geológica anteriormente denominada de R4.
Córrego Contagem	70 metros	Quartzitos finos a médio, localmente grossos, brancos, cinza claro e cinza escuro quando frescos. Bem selecionados, maduros mineralogicamente, em geral muito silicificados e fraturados, de aspecto maciço. Exposição no Distrito Federal: sustenta as áreas mais elevadas de Brasília, com afloramentos nas bordas do domo do Pípiripau e no vale do rio Paranoá. Refere-se à unidade geológica anteriormente denominada de Q3.
Serra da Meia Noite	90 metros	Metarritmito arenoso caracterizado por alternância de estratos centimétricos a métricos de quartzitos finos a médios, com níveis mais delgados de metassiltitos argilosos, metalamitos siltosos e metalamitos micáceos. Refere-se à unidade geológica anteriormente denominada de R3.
Córrego do Torto	70 metros	Ardósias roxas, quando alteradas, e cinza-esverdeada quando frescas, sempre com o aspecto homogêneo. Em seu limite superior ocorrem intercalações siltico-argilosas milimétricas a decimétricas marcando a passagem para unidade de metarritmitos que a recobre. Exposição no Distrito Federal: ocorrência restrita aos núcleos dos Domos Brasília e

		Pipiripau. Refere-se à unidade geológica anteriormente denominada de A.
Córrego Ribeirão Piçarrão	500 metros	Conjunto de metassiltitos argilosos homogêneos com coloração cinza esverdeada a amarelada quando frescos. Essa unidade foi subdividida em três subunidades: subunidade Sa (metassiltito com intercalações de quartzitos finos), subunidade Sb (metassiltito argiloso com laminações plano paralelas) e subunidade Sc (metarritmito com bancos de quartzito arcoseanos). Exposição no DF: São observadas localmente em raros afloramentos no interior do domo Brasília. Observação: representa a base da estratigrafia do grupo Paranoá. Refere-se à unidade geológica anteriormente denominada de S.

No Distrito Federal é possível verificar os principais eventos geológicos regionais, sendo observado, por exemplo, por meio de metamorfitos, a inversão local da estratigrafia, pelo transporte das rochas do grupo Araxá (mais antigas) por sobre as rochas do grupo Paranoá (mais jovens).

Segundo Freitas-Silva & Campos (1999), o grupo Paranoá foi submetido a cinco fases de deformação, cada uma dessas definidas pelo agrupamento de feições planares e lineares identificadas na região, formadas em ambiente dúctil-rúptil a rúptil. Essas fases ordenaram o atual padrão deformacional local, definido por dobras com eixos ortogonais, resultando em sistemas de domos estruturais e bacias, como o domo Brasília, estrutura geológica na qual se encontra inserida a área de estudo desta pesquisa. Seu centro (domo Brasília) é constituído, principalmente, por ardósias, quartzitos e metassiltitos, sendo observados dois padrões principais de fraturamento: um na direção N/NW e outro secundário E/NE, com mergulho vertical e subvertical (Mortari, 1994).

Segundo Blanco (1995), a Companhia do Metropolitano de Brasília (Metrô-DF), com a finalidade de elaborar o projeto da metrovia subterrânea da Asa Sul, realizou uma série de furos de sondagens percussivas obtendo o perfil geológico-geotécnico da Asa Sul (**Figura 1.5**), sendo possível verificar nessa seção, de direção sul-norte, solos com profundidades de até 40 metros.

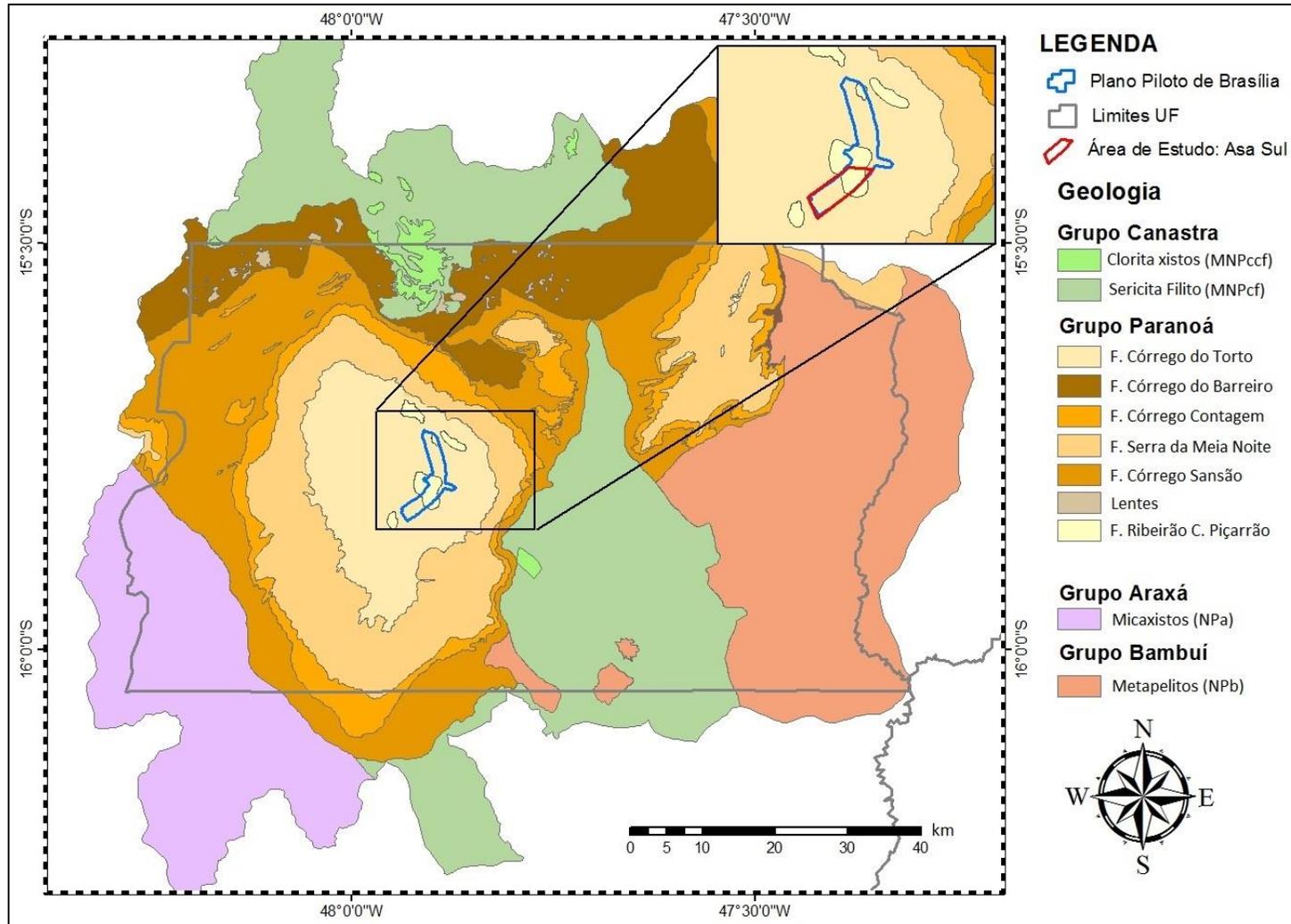


Figura 1. 4: Mapa Geológico do Distrito Federal (Modificado de Freitas-Silva & Campos, 1999 com informações atualizadas com os dados de Campos, 2013). Em destaque pode ser observada a posição da Asa Sul de Brasília, local onde foram realizados os levantamentos geofísicos da presente pesquisa.

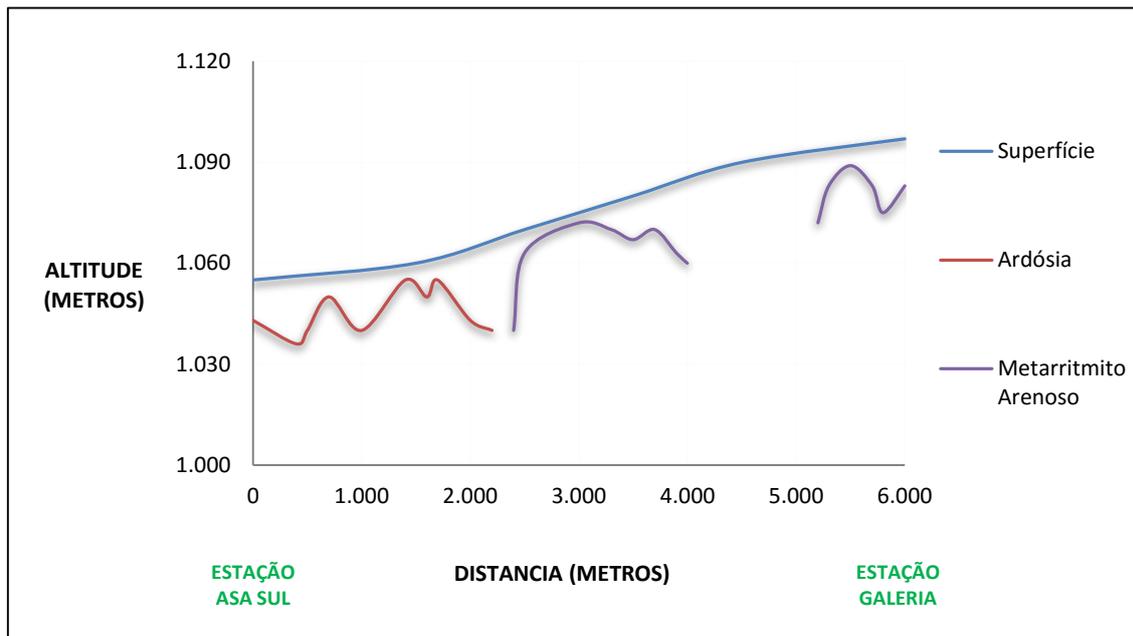


Figura 1. 5: Perfil geológico (sul/norte) da Asa Sul (modificado de Blanco, 1995).

No perfil são identificadas litologias da porção basal do grupo Paranoá como ardósias e metarritmitos arenosos, este último provavelmente relacionado à subunidade Sc, da Formação Ribeirão Piçarrão.

Estas litologias se encontram intensamente dobradas e fraturadas, sendo comum o preenchimento das fraturas por quartzo leitoso. Blanco (1995), destaca que ambas as rochas sofreram um ataque químico bastante forte, sendo comum a identificação de saprólitos bem desenvolvidos, com até 10 metros de espessura. Todo esse material é recoberto por solo argiloso alóctone.

A ardósia é encontrada do início do perfil (próximo à estação de metrô denominada de Asa Sul) até a Estação 112 Sul, localizada entre as Superquadras 111 e 112 Sul. As ardósias possuem coloração vermelho-arroxeadas a cinza prateada, com clivagem proeminente e muito fraturada, acamamento com direção N/NW e mergulhos de 20° a 45° W/SW; o nível d'água é encontrado a partir de 10 metros de profundidade (Macedo *et al.*, 1994).

O metarritmito arenoso é encontrado entre a Estação 112 Sul e a Estação Galeria dos Estados, localizada no Setor Comercial Sul. São constituídos ritmos arenosos a areno-siltosos intercalados por lentes de quartzitos friáveis, tendo espessura de aproximadamente 40 metros. Esta litologia se encontra dobrada segundo duas antiformes e uma sinforme, com eixos N20W e N40W e mergulho para SE. Entre as Estações 104 e 108 Sul o solo é bastante espesso, atingindo profundidades de até 40 metros, devido provavelmente a uma "calha" estrutural, não tendo sido alcançado o nível d'água nesta área (Macedo *et al.*, 1994).

1.1.2.GEOMORFOLOGIA

O relevo do Distrito Federal é formado predominantemente por relevos residuais de aplainamento e depressões periféricas e interplanálticas. Segundo Novaes Pinto (1994), são identificadas nessa região três macrounidades geomorfológicas: de chapada, de dissecação de vale e de dissecação intermediária (**Figura 1.6**).

A região de chapada é caracterizada por topografia plana e plano ondulada e cotas altimétrica acima de 1.000 m. Ocupa cerca de 34% da área do Distrito Federal.

A região dissecada de vale corresponde às depressões formadas pelos principais rios do Distrito Federal, ou seja, pelas áreas de drenagens dos rios São Bartolomeu, Maranhão, Descoberto e Alagado. Ocupa cerca 35% do território do Distrito Federal.

A região de dissecação intermediária corresponde às áreas de ocorrência de chapada retrabalhada por processos de pediplanação, sendo subdividida no Distrito Federal em duas subunidades de acordo com a geologia: uma entre o vale do Rio Preto e vale do Rio São Bartolomeu, e a depressão do Paranoá, na qual está situada a cidade de Brasília. A região de dissecação intermediária ocupa cerca de 31% do Distrito Federal.

A depressão do Paranoá ocupa o núcleo semidômico do Paranoá e apresenta uma variação topográfica suave acima da cota de 1.000 m, conforme pode ser observado no modelo digital efetuado por De Souza Martins *et al.* (2008) (**Figura 1.7**). Essa subunidade foi formada a partir de basculamentos pliocênicos, movimentando o material detrítico em direção às calhas do sistema de drenagem e formando, assim, um extenso pediplano inclinado em direção ao vale do rio Paranoá. Segundo Novaes Pinto (1994) este pediplano sofreu ainda retrabalhamentos durante o pleistoceno, formando anfiteatros de erosão e níveis pedimentados retilíneos-côncavos observados em afluentes do rio Paranoá.

Novaes Pinto (1994) ainda propôs que as três macrounidades deveriam ser divididas em 13 unidade geomorfológicas. Assim a Região de Chapada foi dividida em Chapada da Contagem, Chapada de Brasília, Chapada do Pipiripau, Chapada do Divisor São Bartolomeu-Preto e Chapada do Divisor Descoberto-Alagado. A Área de Dissecação Intermediária foi dividida em Depressão do Paranoá e Vale do Rio Preto. E a Região Dissecada de Vale foi dividida em Curso Superior do Rio Maranhão, Alto Curso Superior do Rio São Bartolomeu, Curso Superior do Rio São Bartolomeu, Alto Curso Superior do Rio Descoberto, Curso Superior do Rio Descoberto e Alto Curso do Rio Alagado.

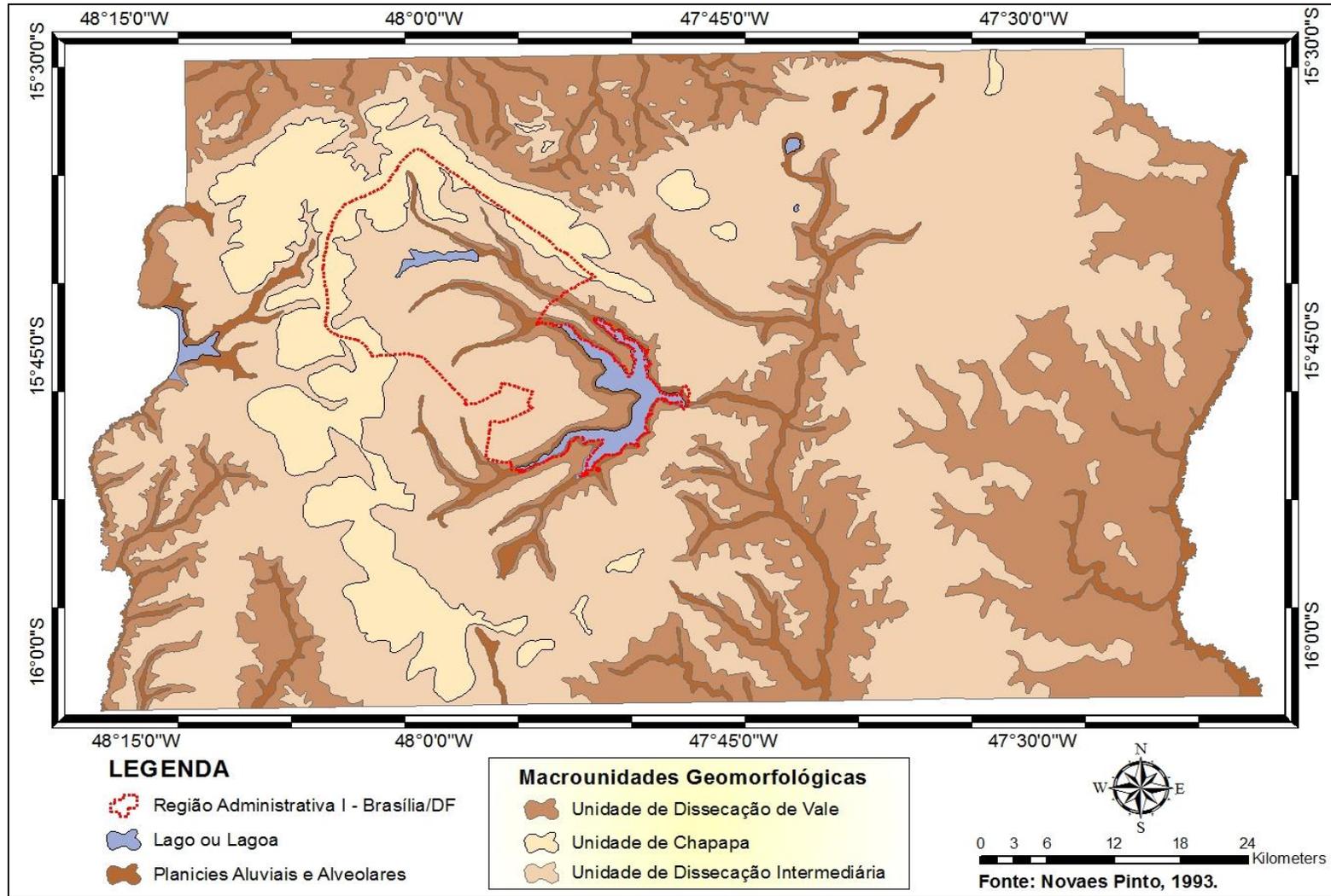


Figura 1. 6: Macrounidades geomorfológicas do Distrito Federal (Modificado de Novais Pinto, 1993).

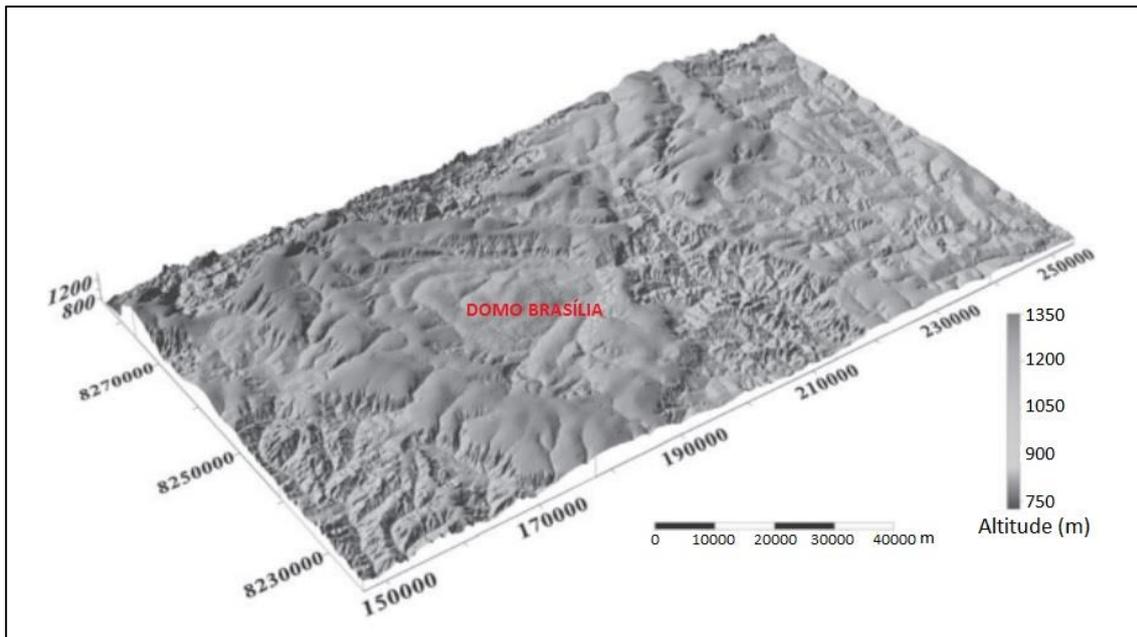


Figura 1. 7: Modelo Digital do Terreno do território do Distrito Federal (De Souza Martins *et al.*, 2008).

1.1.3.SOLOS

Segundo mapeamento executado pela EMBRAPA em 1978, republicado em 2006, o Distrito Federal, em função de suas coberturas, pode ser dividido em dois grupos: o primeiro composto latossolos vermelhos vermelho-amarelos e cambissolo háplico e o segundo por diferentes classes de solos como: nitossolo, chernossolo, gleissolo, organossolo, neossolo quartzarênico, neossolo flúvico e neossolo litólico.

Os latossolos são solos altamente intemperizados, submetidos a processo de laterização com intensa alteração dos silicatos e concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Este tipo de solo pode apresentar espessuras centimétricas a decamétricas, sendo considerados como solos granulares, friáveis e permeáveis. É comum a formação de latossolos em topos de chapadas, relevos de superfícies planálticas suaves e onduladas (Embrapa Cerrados, 2004).

Em condições naturais, os latossolos possuem limitações para o uso agrícola e resistência a processos erosivos. Em seções típicas é caracterizado pela sequência morfológica nítida de horizontes texturais A, B e C, no caso do latossolo vermelho, e horizontes texturais A, AB e B, no caso do latossolo vermelho-amarelo (Embrapa Cerrados, 2004).

Na área de estudo, a presença de latossolos foi descrita por Macedo *et al.* (1994) com base em perfis de escavações do Metro/DF, tendo sido desenvolvidos tanto sobre ardósias quanto nos metarritmitos arenosos do Grupo Paranoá.

Os solos residuais formados sobre a unidade Ardósia são caracterizados por serem predominantemente argilo-siltosos, com espessuras variando de 2 a 5 metros, e saturados. A interface solo-rocha é composta por material de mesma composição do solo, de coloração marrom-avermelhado, índice de resistência a penetração NSPT 5 até impenetrável, espessura podendo chegar a 100 metros, fortemente estruturado, com foliações proeminentes preservadas (Macedo *et al.*, 1994).

Os solos residuais formados sobre os metarritmitos são caracterizados por conter alternâncias de camadas arenosas finas e siltosas, com espessura variando de centimétricas a métricas. A interface solo-rocha é composta por material arenoso constituído predominantemente por areia fina a média e silte, NSPT de 7 até impenetrável. Este saprólito pode conter cimento lixiviado resultando em níveis de areia friável, apesar disso, é comum a ocorrência de bloco e lentes de quartzito silicificado (Macedo *et al.*, 1994).

Além de solos residuais, são observados solos de origem transportada ou alóctone denominados por Mortari (1994) de argila porosa. Na Asa Sul este solo recobre os pacotes de solos e rochas já descritos, sendo constituídos por materiais finos, com predominância da fração argila, alta porosidade, sem indício de estrutura reliquiar. O material vai de mole a muito mole (NSPT entre 1 e 6) e sua espessura varia de poucos metros a mais de 40 metros. Macedo *et al.* (1994; *apud* Blanco, 1995) mostrou que sobre a unidade Ardósia a argila porosa estava saturada e sobre os metarritmitos arenosos apresentava-se não-saturada.

Durante as escavações do túnel do metrô na Asa Sul, conforme já informado anteriormente, foi possível obter seções dos solos descritos. Na **Figura 1.8**, podem ser observadas as seções da interface solo-rocha por sobre rochas da unidade Ardósia e da argila porosa.

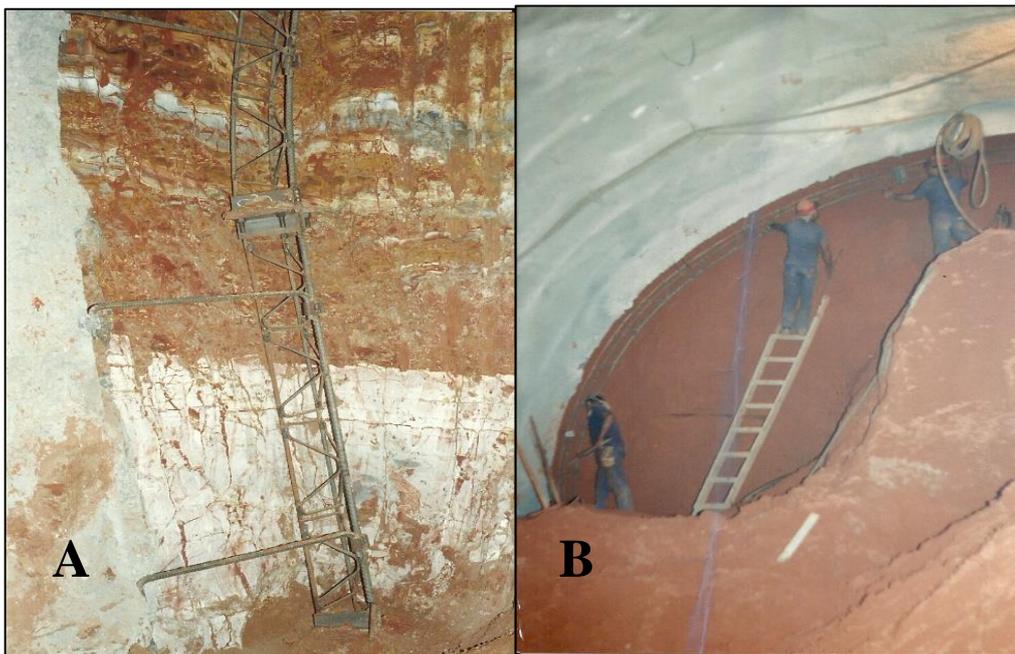


Figura 1. 8: Frente de escavação do túnel de metrô da Asa Sul (fotos do acervo pessoal do Engenheiro Arnaldo Ferreira da Costa): A) exposição da interface solo-rocha da unidade Ardósia; B) exposição de argila porosa.

1.1.4. CLIMA E REGIME PLUVIOMÉTRICO

O clima predominante no domínio do Cerrado, bioma que ocupa 100% do território do Distrito Federal, é o Tropical Sazonal, de inverno seco. A temperatura média anual fica em torno de 22-23°C; com as máximas mensais podendo chegar a mais de 40°C e as mínimas atingindo temperaturas próximas a zero, nos meses de maio, junho e julho (Marcuzzo *et al.*, 2012).

A precipitação média anual fica entre 1.200 e 1.800 mm e a precipitação média mensal apresenta grande estacionalidade, concentrando-se nos meses de primavera e verão (outubro a março), que é a estação chuvosa. Nos meses de maio a setembro, estação seca, os índices pluviométricos mensais reduzem bastante, podendo chegar a zero (Marcuzzo *et al.*, 2012).

Coutinho (2002; *apud* Marcuzzo *et al.*, 2012) considera que durante a estação seca, no início do período matutino é comum a formação de nevoeiros, formando grande quantidade de orvalho sobre as plantas, umedecendo o solo. Já no período da tarde os índices de umidade relativa do ar caem, podendo baixar a valores próximos a 15%, principalmente nos meses de julho e agosto.

Segundo Marcuzzo *et al.* (2012), a maior precipitação observada no bioma Cerrado na região Centro-Oeste, entre os anos de 1977 a 2006, foi de 1.755,70 mm no ano de 1982 e a menor foi de 1.249,15 mm no ano de 2002. Já a maior variação da precipitação anual ocorreu entre o ano de 1992 (1.750,04 mm) e o ano de 1993 (1.332,92 mm).

O clima no Distrito Federal, segundo classificação de Köppen, é definido como tropical com a concentração da precipitação pluviométrica no período de verão. Os meses mais chuvosos são novembro, dezembro e janeiro e a época seca ocorre nos meses de inverno, ou seja, de junho a agosto (Baptista, 1997). Tal descrição coincide, portanto, com padrão climático do bioma Cerrado. Apesar disso, a Codeplan (1984; *apud* Baptista, 1997) destaca que as diferenças altimétricas, no Distrito Federal, são responsáveis por variações na temperatura, permitindo a subdivisão nos seguintes tipos climáticos, conforme, ainda, classificação de Köppen:

- Tropical (Aw) - Clima de savana, cuja temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C. Este tipo situa-se aproximadamente nos locais com cotas altimétricas abaixo de 1.000 metros, como as bacias hidrográficas do São Bartolomeu, Preto, Descoberto e Maranhão.
- Tropical de Altitude (Cwa) - O mês mais frio possui temperatura média inferior a 18°C e no mais quente média superior a 22°C. Corresponde ao Pediplano de Brasília (altitudes entre 1.000 e 1.200 metros).
- Tropical de Altitude (Cwb) - Caracterizado por uma temperatura média inferior a 18°C no mês mais frio e no mais quente média inferior a 22°C. Abrange as áreas com cotas altimétricas acima de 1.200 metros (Pediplano Contagem / Rodeador).

A precipitação média anual no Distrito Federal é da ordem de 1500 mm, com distribuição irregular, nas quais as menores alturas pluviométricas anuais ocorrem na porção leste e as mais elevadas estão concentradas a NE e SE (Baptista, 1998).

A condição pluviométrica mensal do Distrito Federal pode ser observada na **Figura 1.9**, reproduzido com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2015), extraídos da estação OMM: 83377, que apresenta a distribuição mensal de chuva entre 1963 e 1990, ou seja, a média aritmética de precipitação de cada mês ao longo dos mencionados anos.

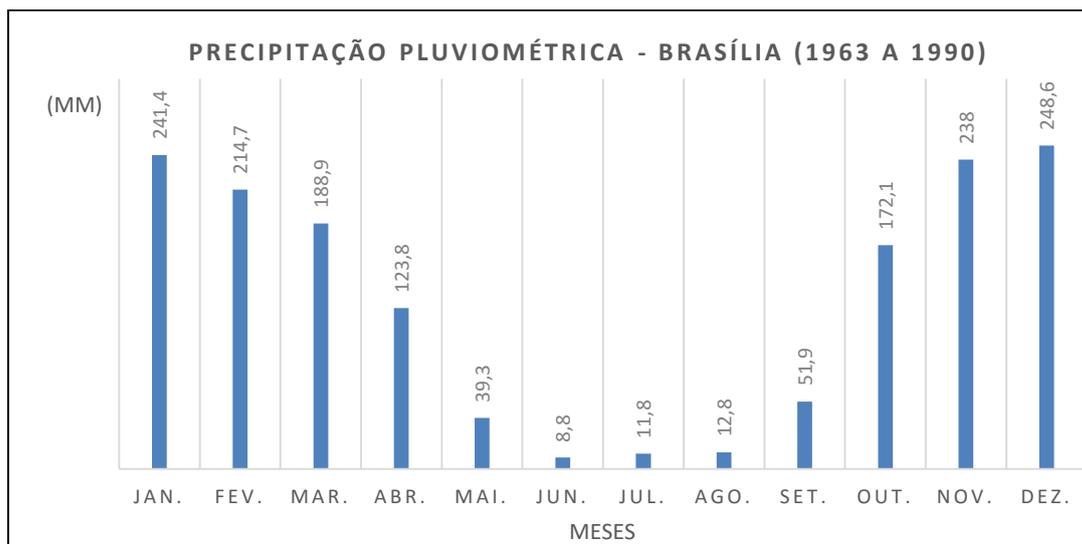
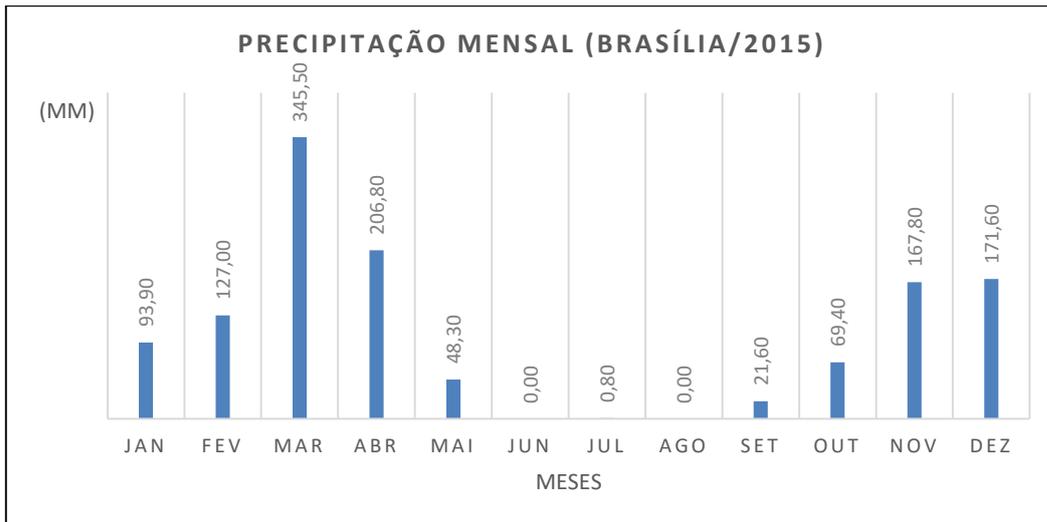


Figura 1. 9: Precipitação pluviométrica média mensal de Brasília entre 1963 e 1990 (INMET, 2015).

No ano de 2015, ano em que foram coletados os dados de campo da presente pesquisa, o gráfico de precipitação pluviométrica média mensal (**Figura 1.10**) mostra que entre os meses de junho a novembro os valores de precipitação acumulados ficaram abaixo dos 100 mm, bem abaixo do esperado (245 mm), quando comparada com a série de dados apresentada na **Figura 1.9**.

Coimbra (1987; *apud* Campos, 2004) considera que entre os meses de maio a setembro predomina, no Distrito Federal, o déficit hídrico, enquanto o período de outubro a abril, em geral, observa-se o superávit. Entretanto, somente pela observação precipitação no ano de 2015, considera-se o déficit se prolongou até o mês de dezembro, visto que entre o dia 01 de junho de 2015 e o dia 14 de novembro de 2015 (168 dias) precipitou apenas 107 mm (INMET, 2017).

Coimbra (1987; *apud* Campos, 2004) estimou também que aproximadamente 12% da quantidade total de chuva anual efetivamente infiltra na zona vadosa e alcançam a zona saturada dos aquíferos. Isso considerado, nesse período de 168 dias, quase meio ano, teria infiltrado no solo menos que 10% de toda a água prevista para se infiltrar em 2015.



1.1.5.HIDROGEOLOGIA

Figura 1. 10: Precipitação pluviométrica mensal de Brasília em 2015 (INMET, 2017).

Central, conjunto formado por grande parte da Faixa de Dobramentos Paraguai/Araguaia e parte Sul do Cráton Amazônico. O território do Distrito Federal está localizado em um alto regional da citada Província, sendo uma região de nascentes, com a função hidrológica de manutenção das vazões de rios e aquíferos locais/regionais.

Conforme já detalhado anteriormente, a geologia do Distrito Federal é caracterizada por rochas metamórficas recobertas por espesso manto de intemperismo, tendo por isso se convencionado a divisão dos aquíferos dessa região em dois grandes reservatórios ou domínios: poroso e fraturado (Campos, 2004).

O Domínio Poroso é caracterizado por meio geológico onde os processos de transporte e armazenamento de água se dão pela porosidade advinda de vazios intergranulares, representado principalmente por solos, saprólitos e aluviões. Esses aquíferos assumem importância local em função principalmente da espessura saturada e da condutividade hidráulica que possuem. São do tipo livres e/ou suspensos, com ampla continuidade lateral, rasos e sofrem variações significativas de volume em função da sazonalidade climática, e por causa disso, são moderadamente susceptíveis a contaminações por agentes externos (Campos, 2004).

O Domínio Poroso no Distrito Federal foi dividido em quatro sistemas, assim denominados, do maior para a menor espessura e condutividade hidráulica: P₁, P₂, P₃ e P₄ (Campos, 2004).

O Domínio Fraturado é caracterizado pelos meios rochosos locais, onde os processos de transporte e armazenamento de água se dão por discontinuidades planares, planos de fraturas, microfraturas, diáclases, zonas de cisalhamento e falhas, ou seja, a água ocupa a porosidade secundária das rochas. Os aquíferos do Domínio Fraturado podem ser livres ou

confinados, com extensão lateral e parâmetros hidrodinâmicos variando em função do tipo geológico (Campos, 2004). Vale informar, que num mesmo tipo litológico os parâmetros hidrodinâmicos podem variar significativamente, sendo a densidade das descontinuidades o principal condicionante desses aquíferos.

O Domínio Fraturado, no Distrito Federal, foi dividido em 4 sistemas aquíferos: Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí. O sistema Paranoá é subdividido nos subsistemas S/A, A, R₃/Q₃, R₄ e PPC, e o sistema Canastra nos subsistemas F e Q/F/M (Campos, 2004).

A subdivisão e vazões de referência dos aquíferos dos domínios poroso e fraturado estão dispostos na **Tabela 1.2**. Nota-se que, em termos de produção de água, os aquíferos do Domínio Fraturados se destacam em relação àqueles do Domínio Poroso. Entretanto, segundo Campos (2004), a recarga dos aquíferos do Domínio Fraturado dependem da função recarga dos aquíferos porosos.

Tabela 1. 2: Resumo da classificação dos domínios aquíferos dos Distrito Federal, com as respectivas vazões médias (Modificado de Freitas-Silva & Campos, 1999 *apud* Campos, 2004).

DOMÍNIO	SISTEMA	SUBSISTEMA	MÉDIAS DAS VAZÕES (l/h)
Poroso	P ₁	-	< 800
Poroso	P ₂	-	
Poroso	P ₃	-	
Poroso	P ₄	-	
Fraturado	Paranoá	S/A	12.000
Fraturado	Paranoá	A	4.000
Fraturado	Paranoá	Q ₃ /R ₃	12.000
Fraturado	Paranoá	R ₄	6.000
Fraturado	Paranoá	PPC	9.000
Fraturado	Canastra	F	7.000
Fraturado	Canastra	F/Q/M	33.000
Fraturado	Bambuí	-	5.000
Fraturado	Araxá	-	3.000

Como visto, os sistemas e subsistemas aquíferos do Domínio Fraturado, no Distrito Federal, se relacionam diretamente às litologias e grupo de rochas nas quais esses se desenvolvem. Da mesma forma, os sistemas do Domínio Poroso se relacionam com os solos dos quais são constituídos, assim, o sistema P₁ se relaciona a latossolos arenosos e neossolos quartzarênicos, o P₂ com Latossolos argilosos, o P₃ com plintossolos e argissolos e o P₄ com os cambissolo e neossolo lítólico (Freitas-Silva & Campos, 1999 *apud* ZEE RIDE, 2009).

Na Asa Sul, área de estudo do presente trabalho, infere-se, então, com base na descrição dos solos locais, que sistema poroso presente no latossolo argiloso sobreposto por argila porosa fazem parte do sistema P₂ e aqueles presentes no latossolo arenoso sobreposto pela argila porosa fazem parte do sistema P₁.

Com relação aos aquíferos fraturados, na área de estudo são encontrados dois litotipos principais: as ardósias e os metarritmitos arenosos, ambos pertencentes ao grupo Paranoá, logo, espera-se que os aquíferos locais constituam o sistema Paranoá/subsistema A e/ou sistema Paranoá/subsistema S/A.

Conforme disposto em itens anteriores, a interface saprólito/ardósia está saturada, o que leva a interpretação de que existe uma interface do sistema P2 com o Sistema Paranoá/Subsistema A.

A partir da SQS 108 até a SQS 104 não foi registrada a presença de água em nenhum dos poços realizados no local, devido provavelmente a uma “calha” estrutural (Macedo *et al.*, 1994), nem do sistema poroso, nem do sistema fraturado. Assim apesar de a pedologia e a geologia indicarem características adequadas para o desenvolvimento de aquíferos - no caso do Poroso, do sistema P₁ e no caso do Fraturado do sistema Paranoá/subsistema S – estes de fato não foram devidamente identificados no local.

1.1.6.CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

A contextualização geológico-geotécnica da área de estudo consiste no agrupamento, em classes, dos parâmetros físicos descritos neste capítulo e têm como principais funções qualificar e subdividir terreno em estudo, apresentando áreas com características gerais esperadas. Assim, a área de estudo foi subdividida em 3 classes (**Figura 1.11**), com base nos trabalhos dos seguintes autores: Macedo *et al.*, 1994; Mortari, 1994; Blanco, 1995; Oliveira, 1996; Freitas-Silva e Campos, 1999; Embrapa Cerrados, 2004; Alves, 2009; e Campos, 2013.

A Classe 1 equivale as áreas cujo o substrato geológico é constituído pelos metarritmitos arenosos da Unidade S, sobrepostos por coberturas de argila porosa e latossolos arenosos. Nessa área, o relevo é suave, tendo sido encontrado o nível d'água entre 5 e 20 metros de profundidade. Os aquíferos identificados são o P₁ e o Sistema Paranoá/Subsistema S/A.

A Classe 2 em termos de substrato geológico e relevo é idêntica a Classe 1. Quanto à cobertura, na área foi somente identificada a argila porosa e quanto hidrogeologia não foram identificados aquíferos.

A Classe 3 equivale as áreas cujo o substrato geológico é constituído pela ardósia da Unidade A, sobrepostos por coberturas de argila porosa e latossolos argilosos. Nessa área, o relevo é suave, tendo sido encontrado o nível d'água entre 5 e 20 metros de profundidade. Os aquíferos identificados são o P₂ e o Sistema Paranoá/Subsistema A.

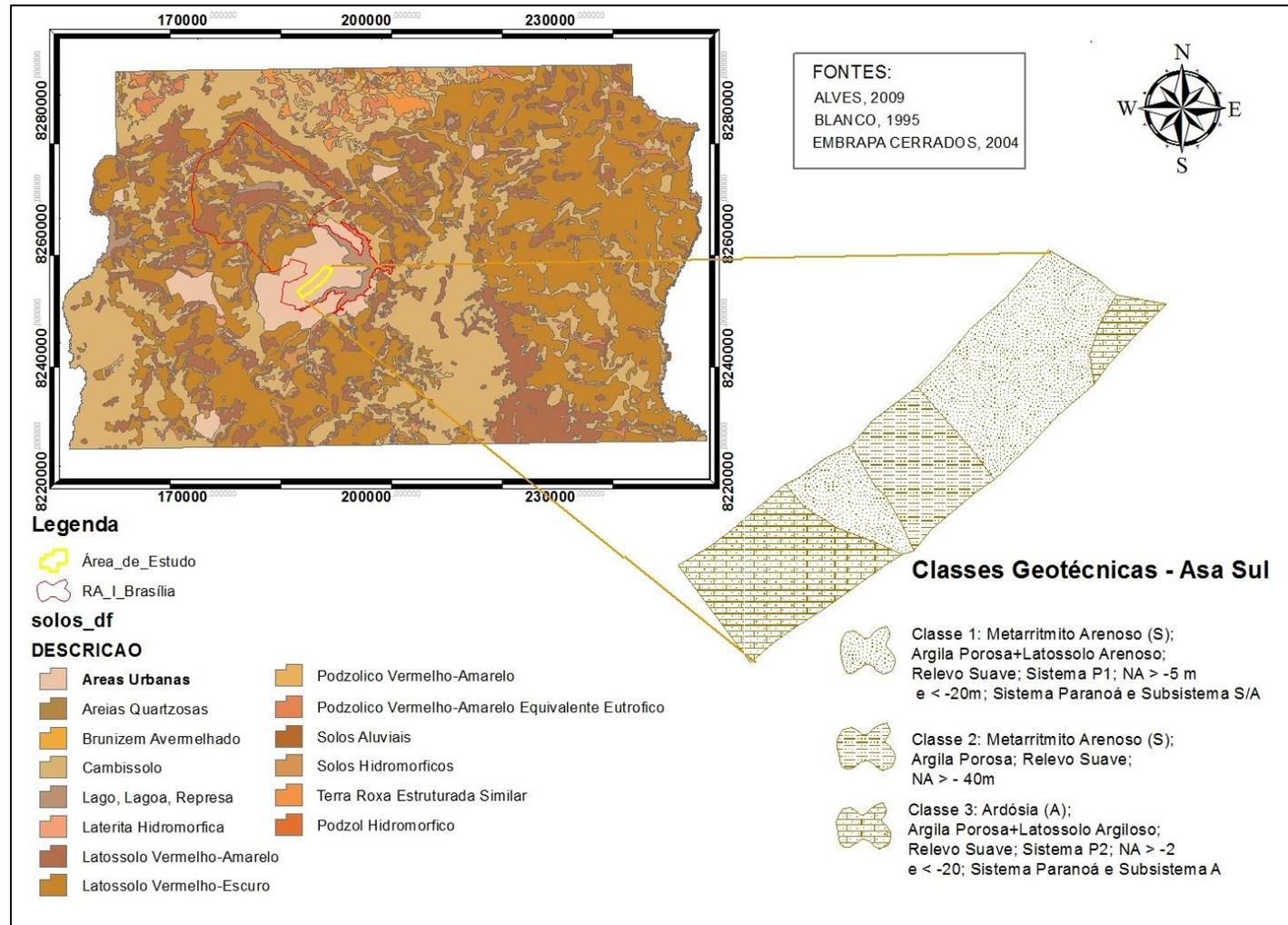


Figura 1. 11: Contextualização Geológica-Geotécnica da área de estudo, Asa Sul de Brasília-DF.

Por fim, considera-se que pela alta condutividade hidráulica do solo em toda área, excluindo àquelas impermeabilizadas pela ocupação urbana, a cobertura no período chuvoso, de outubro a abril, estará de úmida a saturada em seus primeiros metros, em alguns pontos, inclusive, é comum o aparecimento de surgência de água pela elevação do nível freático local.

1.1.7.USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A Asa Sul é um bairro de urbanização consolidada, sendo enquadrado pelo Plano Diretor de Zoneamento Territorial de Distrito Federal (PDOT, 2009) como uma Zona Urbana do Conjunto Tombado, zona urbana de especial interesse histórico, cultural, urbanístico, paisagístico e ambiental de Brasília. Nessa Zona devem ser respeitadas restrições estabelecidas para preservação do Conjunto Urbanístico Tombado como Patrimônio Nacional da UNESCO (Patrimônio Cultural da Humanidade).

Apesar do enquadramento, sendo regulada pelo Plano do Conjunto Urbanístico de Brasília (PLC nº 52/2012), rigoroso documento que define e descrevem os parâmetros urbanísticos e construtivos de áreas nessa zona urbana específica, a Asa Sul está sujeita à intensa demanda de novos espaços e infraestruturas urbana.

Assim, a pesquisa ora desenvolvida assume caráter estratégico, pois o uso do solo da Asa Sul, em especial no que se refere à implantação de equipamentos públicos de transporte, se torna cada vez mais restrito e ao mesmo tempo necessário, o que corrobora e incentiva o uso de métodos de investigações não destrutivos como aqui proposto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Solos são, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995), em sua NBR 6502, “material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica, ou simplesmente produto da decomposição e desintegração das rochas pela ação de agentes atmosféricos”.

Os solos são constituídos por um conjunto de partículas sólidas (grãos) com água (ou outro líquido) e ar nos espaços intergranulares (porosidade). Esses grãos, normalmente encontram-se livres entre si, mas em equilíbrio com os demais grãos, às vezes, porque existem cimentos entre eles, às vezes por causa de forças eletroquímicas que mantêm a coesão do solo e, até mesmo, devido ao atrito entre as arestas e faces de cada grão.

Na engenharia interessa particularmente a forma de como esses solos reagem quando submetidos ao corte, suporte e perfurações advindas da atuação humana por meio de suas construções e demais atividades. Essa atuação pode vir na forma de uma deformação, amortecimento, movimento e resistência ao esforço despendido.

Neste trabalho, às formações de solos, com seus materiais, camadas e estruturas são genericamente designadas de maciços terrosos ou simplesmente maciços, seguindo denominação de praxe praticada na geologia de engenharia.

2.1. PROPRIEDADES DOS SOLOS

Para caracterização dos solos e, em especial, para a caracterização dos solos na engenharia, é necessário prévio conhecimento das propriedades físicas e químicas dos materiais que o compõe, propriedades como tamanho dos grãos, constituição mineralógica, porosidade, saturação em água, entre outras.

O solo é, como já mencionado, constituído por três fases: partículas sólidas (grãos), água e ar, logo seu comportamento dependerá da quantidade relativa de cada uma dessas três fases. Para identificar o estado do solo, são utilizados índices físicos que correlacionam os pesos e volumes das fases dos solos (**Tabela 2.1**).

A diversidade de tamanhos das partículas sólidas ou grãos é enorme, por esse motivo se convencionou o uso de faixas de tamanho ou granulometria, sendo essas variáveis dependendo da classificação de solos adotada. No Brasil se convencionou o uso das faixas definidas pela ABNT NBR 6502:1995 (**Tabela 2.2**).

A proporção relativa das frações granulométricas de tamanho inferior a 2 mm e que compõem a massa de solo é definida como textura (Lemos e Santos, 1996). Pelo fato de ocorrerem várias frações de grãos no solo, em combinações diversas, é necessário o seu

agrupamento em classes texturais. Esses agrupamentos comumente são diagramados na forma de triângulos texturais como o apresentado na **Figura 2.1**.

Tabela 2. 1: Principais índices que indicam o estado dos solos (Pinto, 2006).

ÍNDICES	DEFINIÇÕES
Relação entre Pesos	
Umidade	Relação entre o peso da água e o peso dos sólidos. Identificado pela letra <i>w</i> . Em geral, os teores variam entre 10 e 40%.
Relação entre Volumes	
Vazios	Relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas. Identificado pela letra <i>e</i> . Em geral, os valores se situam entre 0,5 e 1,5 (adimensional).
Porosidade	Relação entre o volume de vazios e o volume total. Identificado pela letra <i>n</i> . Em geral, os valores variam entre 30 e 70%.
Grau de Saturação	Relação entre o volume de água e o volume de vazios. Identificado pela letra <i>S</i> . Varia entre zero e 100% (solo saturado).
Relação entre Pesos e Volumes	
Peso Específico dos Sólidos (ou dos grãos)	Relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume. Identificado pelo símbolo γ_s . Solos em geral, situam próximo a 27 kN/m ³ . Solos arenosos, 26,5 kN/m ³ e argilas lateríticas 30 kN/m ³ .
Peso Específico da água	Identificado pelo símbolo γ_w . Adota-se valor igual a 10 kN/m ³ .
Peso Específico Natural (ou somente peso específico do solo)	Relação entre o peso total do solo e seu volume total. Identificado pelo símbolo γ_n . Solos em geral, situam entre 19 e 20 kN/m ³ .
Peso Específico Aparente Seco	Relação entre o peso dos sólidos e o volume total. Identificado pelo símbolo γ_d . Situa-se entre 13 e 19kN/m ³ .
Peso Específico Aparente Saturado	Corresponde ao peso específico do solo saturado, sem variação de volume. Identificado pelo símbolo γ_{sat} . Em geral, situa-se em valores próximos à 20kN/m ³ .
Peso Específico Submerso	É o peso específico do solo quando submerso, ou o peso específico natural menos o peso específico da água. Identificado pelo símbolo γ_{sub} . Situa-se, em geral, com valores próximo a 10kN/m ³ .
Massa Específica	Relação entre a matéria e o volume. Identificada com o símbolo μ . O peso específico é o produto entre μ e <i>g</i> (aceleração da gravidade). Expresso em Ton/m ³ e g/cm ³ .

Os solos são também classificados como coesivos, não-coesivos e mistos, com base na propriedade denominada coesão. Silva e Carvalho (2007) definem a coesão como a força de atração entre as superfícies das partículas que compõem os solos. Para Vargas (1977) coesão é aquela resistência que a fração argilosa empresta ao solo, pelo qual ele se torna capaz de se manter coeso, em forma de torrões ou blocos, ou pode ser cortado em maneiras

diversas e manter a forma. Os solos que têm essa propriedade são denominados de coesivos (argilosos), já os que desagregam facilmente ao serem cortados e/ou escavados são denominados de não coesivos (areias e pedregulhos), e, por fim, aqueles que têm características mistas, denominados de solos mistos (mistura de argilas, siltes e areias finas).

Os materiais constituídos pelo conjunto dos grãos de silte e argilas, comumente, são denominados de fração fina dos solos, enquanto o conjunto areia e pedregulhos compõem a fração grossa ou grosseira do solo (Pinto, 2006).

Em termos de constituição mineralógica, um solo é composto por diferentes minerais, como quartzos, feldspatos, gibasitas, calcitas e micas com as mais diferentes formas e tamanho.

O quartzo, presente na maioria das rochas, é resistente à desagregação física e química, formando em geral grãos de silte, areias e pedregulhos. Os demais minerais são menos resistentes e mais susceptíveis a ataques químicos, dando origem aos argilominerais (Pinto, 2006).

Tabela 2. 2: Frações de solos e suas faixas granulométricas (ABNT NBR 6502:1995).

FRAÇÃO	FAIXA GRANULOMÉTRICA
Bloco	Superior a 1 m
Matacão	200 mm - 1 m
Pedra	60 mm - 200 mm
Pedregulho Grosso	20 mm - 60 mm
Pedregulho Médio	6 mm - 20 mm
Pedregulho Fino	2 mm - 6 mm
Areia Grossa	0,6 mm - 2 mm
Areia Média	0,2 mm - 0,6 mm
Areia Fina	0,06 mm - 0,2 mm
Silte	0,002 - 0,06 mm
Argila	Menores que 0,002 mm

Os argilominerais apresentam estruturas complexas, prevalecendo dois tipos principais de estruturas: tetraedros justapostos num plano, com átomos de silício ligados a quatro átomos de oxigênio, e octaedros, em que um átomo de alumínio é circundado por oxigênios e hidroxilas (OH). Assim, os diferentes argilominerais resultam da combinação dessas duas estruturas básicas. Por exemplo, a caulinita é formada por uma camada tetraédrica e outra camada octaédrica, estrutura do tipo 1:1. Já as esmectitas e ilitas são formadas pelo arranjo de uma estrutura octaédrica entre duas estruturas tetraédricas, do tipo 2:1. A partir desses arranjos se define o tamanho dos grãos dos argilo minerais, sendo, por exemplo, a esmectita é 100 vezes maior que a caulinita (Pinto, 2006).

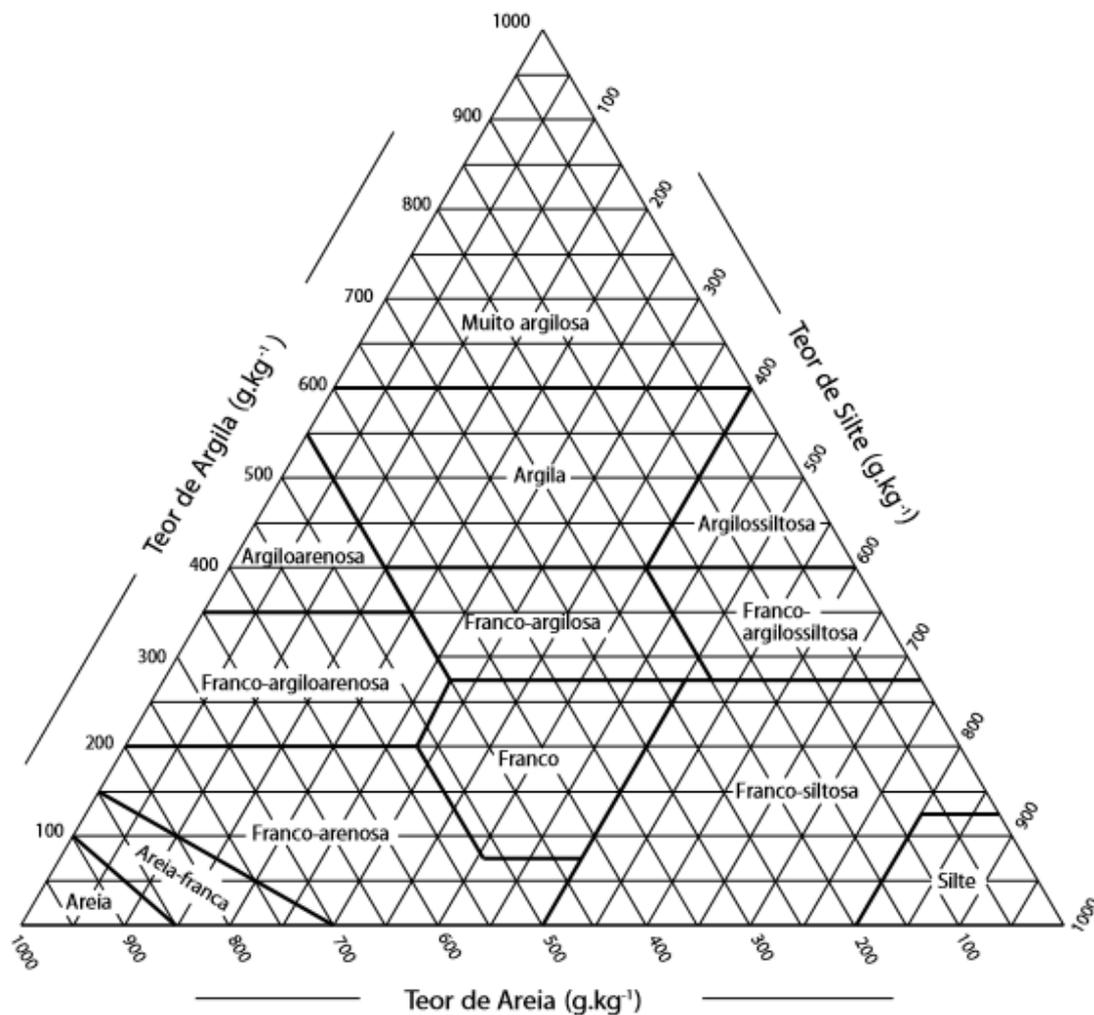


Figura 2. 1: Exemplo de triângulo textural (Lemos e Santos, 1996).

Uma característica importante dos argilominerais é a superfície específica, definida como superfície total de um conjunto de partículas divididas pelo peso do argilomineral. As forças presentes nestas superfícies influenciam no comportamento coloidal dos solos, sendo esta característica determinante para o desempenho de um solo quando exposto a um esforço mecânico (Pinto, 2006).

Essas forças resultam de cátions e íons livres nos solos, como por exemplo, o Ca^{++} ou Na^+ aderidos aos argilominerais do tipo esmectitas (2:1). Esses atraem camadas contíguas com pequenas forças, que não impedem a entrada de água entre as camadas. Essa liberdade de entrada e saída da água entre as placas das esmectitas explica a elevada capacidade de absorção de água dessa argila, sua expansão quando saturada e sua retração ao secar (Pinto, 2006).

No caso da illita, que tem a estrutura similar às das esmectitas, a presença de íons de potássio provoca uma força de ligação mais forte, dificultando a entrada de água entre suas

camadas, dessa forma o solo se expandirá menos com a presença de água. Logo, a presença de cátions e íons adsorvidos pelos argilominerais condicionam o comportamento de um solo (Pinto, 2006). Portanto, combinação das forças de atração e repulsão entre as partículas resulta na estruturação dos solos, e essa se refere à disposição das partículas nas massas de solo e às forças entre elas.

Assim, a fração fina deve ser mais bem caracterizada visto que as argilas têm grande influência no comportamento do solo e essas partículas possuem superfícies específicas muito vezes bastante distintas. Logo, duas amostras de solo com mesma fração argila podem ter distintos comportamentos mecânicos dependendo a constituição mineralógica da argila presente.

O estudo da fração fina é realizado, na engenharia, de forma indireta a partir da definição de limites e índices que constata a mudança de comportamento da argila conforme seu teor de umidade, limites e índices conhecidos como de Atterberg (Ortigão, 2007).

Quando saturada, a fração de argila se comporta como um líquido, quando muito úmida se comporta de maneira plástica e quando pouco úmida fica quebradiça (Ortigão, 2007). Portanto, o teor de umidade conferirá um estado físico à fração argila, com dois limites claros: um Limite de Liquidez (WL) e um Limite de Plasticidade (WP). A diferença entre os dois define o Índice de Plasticidade (IP), e este determina o caráter de plasticidade de um solo. Assim quanto maior o IP tanto mais plástico será o solo (**Figura 2.2**). Além disso, deve ser mencionado o Limite de Contração (LC), que limita o teor de umidade entre os estados semissólido e sólido.

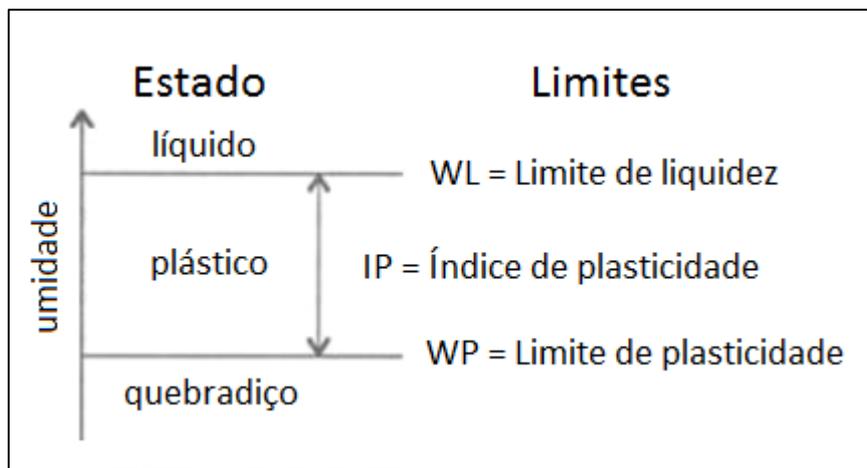


Figura 2. 2: Limites de Atterberg (Pinto, 2006).

Quanto à consistência, que é a resposta do solo às forças externas que tentam deformá-lo e rompê-lo, em diferentes condições de umidade, os solos finos podem ser subdivididos em muito moles, moles, médios, rijos e duros (Pinto, 2006). Tal classificação busca a utilização na prática da engenharia, situando-se essa escala entre o limite de liquidez e

o de plasticidade. No estado plástico situam-se as argilas moles médias e rijas, no estado líquido as argilas muito moles e as duras no estado semissólido, conforme observado na **Figura 2.3**.

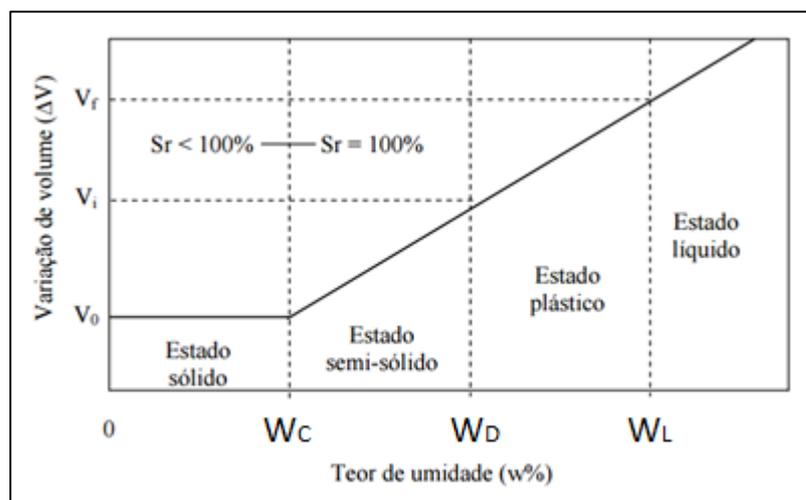


Figura 2. 3: Estados e limites de consistência (Gonçalves *et al.*, 2014).

Assim, quantitativamente, cada tipo de solo argiloso pode ser identificado pelo seu índice de consistência, calculado pela **Equação 2.1**. A **Tabela 2.3** resume as principais faixas de consistência para solos argilosos, segundo Terzaghi, 1948 *apud* Pinto, 2006.

$$IC = \frac{(WL-W)}{IP} \quad (2.1)$$

Tabela 2. 3: Faixas de consistência de solos argilosos (Terzagui, 1948 *apud* Pinto, 2006).

Consistência das Argilas	IC
Muito mole	< 0
Plástica mole	0 - 0,50
Plástica média	0,50 - 0,75
Plástica rija	0,75 - 1,00
Dura	> 1,00

Já a compactidade representa o estado de compactação da areia *in situ*, desde sua condição mais solta até a mais compacta, sendo utilizada para a caracterização mais comum da fração grosseira do solo. Os limites de compactidade de um solo são definidos pelos índices de vazios máximos e mínimos (obtido por vibração de uma amostra), sendo calculado pela **Equação 2.2**, apresentada a seguir:

$$DR \text{ (Compactidade)} = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (2.2)$$

Sendo “*e*” o índice de vazios da areia na condição natural ou de campo.

Na **Tabela 2.4** podem ser observados os valores típicos de e_{min} e e_{max} , com a descrição do tipo de areia e na **Tabela 2.5** são observados a classificação das areias a partir do cálculo do índice de compactidade.

Tabela 2. 4: Valores típicos de e_{min} e e_{max} (Gonçalves *et al.*, 2014).

Descrição da Areia	E_{min}	E_{max}
Areia uniforme de grãos angulares	0,7	1,1
Areia bem graduada de grãos angulares	0,45	0,75
Areia uniforme de grãos arredondados	0,45	0,75
Areia bem graduada de grãos arredondados	0,35	0,65

Tabela 2. 5: Classificação das areias segundo a compactidade relativa (Terzaghi, 1948 *apud* Pinto, 2006).

Compactidade Relativa (DR)	Classificação
< 0,33	Fofa
0,33 - 0,66	Média
>0,66	Compacta

Solos com teores elevados de argila podem apresentar índices de Atterberg mais baixos que aqueles com pequenos teores de argila, pois esses índices variam bastante com a composição mineralógica do argilomineral (Pinto, 2006). Logo, um ensaio de granulometria de um solo qualquer pode acusar valores de areia e silte bem acima dos valores de argila e, mesmo assim, o material pode possuir comportamento de um solo coesivo. Desta forma, é muito importante se conhecer a atividade da fração argila, que pode ser calculada conforme **Equação 2.3**. Em geral a atividade de um solo é avaliada por faixas, conforme proposta por Skempton, 1952 *apud* Mello e Teixeira, 1967 (**Tabela 2.6**):

$$\text{Índice de Atividade} = \frac{\text{Índice de Plasticidade (IP)}}{\text{Fração Argila (menor que 0,002)}} \quad (2.3)$$

Tabela 2. 6: Faixas de atividade de solos argilosos (Skempton, 1952 *apud* Mello e Teixeira, 1967).

ATIVIDADE (Ac)	DENOMINAÇÃO
< 0,75	Inativa
0,75 - 1,25	Normal
> 1,25	Ativa

A sensibilidade é outra propriedade relacionada ao tipo da argila presente no solo. Essa propriedade representa a maior ou menor perda de resistência de um solo argiloso quando ocorre sua desestruturação, ou seja, seu amolgamento. O amolgamento tende a destruir a estrutura original do solo, eliminando as ligações existentes desde a sua formação e provocando, dessa forma, a redução de sua resistência (Gonçalves *et al.*, 2014).

Assim, a relação entre a resistência indeformada e a amolgada é definida como sensibilidade da argila. Essa relação pode ser calculada conforme **Equação 2,4**.

$$Sensibilidade (St) = \frac{Resistência\ ao\ Cisalhamento\ Indeformada\ (Cu)}{Resistência\ ao\ Cisalhamento\ Amolgada\ (Cur)} \quad (2.4)$$

Ortigão (2007) cita que, em geral, as argilas típicas do litoral brasileiro podem ser classificadas como de baixa a média sensibilidade, com base na classificação proposta por Skempton & Northey, 1952 (**Tabela 2.7**) e publicações de pesquisas como as de Aragão (1975) e Ortigão e Collet (1986).

Tabela 2. 7: Sensibilidade de solos argilosos (Skempton & Northey, 1952).

Sensibilidade	St
Baixa	2 a 4
Média	4 a 8
Alta	8 a 16

Ressalta-se que a recuperação da resistência do solo argiloso é possível e depende da propriedade denominada de tixotropia. Essa propriedade é, portanto, definida como fenômeno de recuperação da resistência coesiva do solo, perdida pelo efeito de amolgamento quando esse é colocado em repouso, sendo recompostas as ligações anteriormente presentes entre suas partículas (ABNT NBR 6502:1995).

2.2. COMPORTAMENTO ELÁSTICO DOS SOLOS

Qualquer ponto no interior de uma massa de um solo está sujeito a esforços devido ao seu próprio peso e demais forças externas que atuam no meio no qual esse solo reside. Tendo que a tensão é definida como uma força atuando sobre uma área, de uma maneira simplificada, pode-se dizer que esses esforços resultam em estados de tensão, que podem ser normal e/ou cisalhante, variando em função de um plano considerado (Ortigão, 2007).

A atuação de tensões em um solo, rocha ou qualquer material resulta em uma deformação quando o estado de tensões excede a resistência desses corpos em se manter em equilíbrio. As tensões e deformações são regidas a partir de leis constitutivas (Lopes, 2005). Essas leis representam relações funcionais do tipo causa e efeito, isto é, as tensões impostas (causa) em um material qualquer resultam em deformações, que é o efeito (**Figura 2.4**).

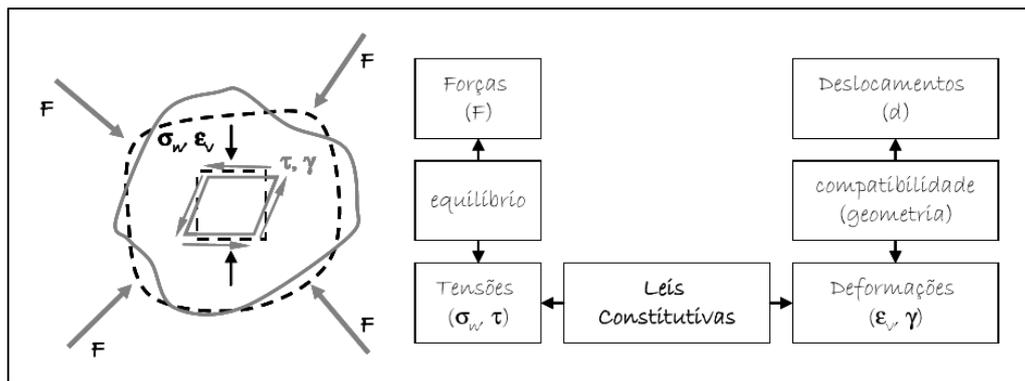


Figura 2. 4: Relação entre forças e deslocamentos, com tensões e deformações num corpo e a forma de as descrever (Maranha das Neves, 2001).

Vallejo (2002), por exemplo, define a deformabilidade como a propriedade que tem uma rocha para alterar sua forma como respostas à ação de forças. Assim, quando é aplicada uma tensão em um corpo, a deformação resultante é definida como a mudança relativa em sua forma e/ou volume em relação as condições iniciais do corpo (Kulhánek, 1993). Quando esses corpos recuperam a forma e o volume original após a remoção da tensão, diz-se, então, que ocorreu uma deformação elástica, visto que a deformação não foi permanente. Ou seja, dependendo da intensidade do conjunto de forças atuando sobre um material, a deformação será permanente ou elástica.

A Lei de Hooke diz que as deformações são linearmente proporcionais a tensões aplicadas, desde que a tensão não exceda o limite de elasticidade. Já Panitz (2007) destaca que um material se comportará elasticamente ou não dependendo fundamentalmente de três fatores: homogeneidade, isotropia e continuidade.

A homogeneidade é uma medida da continuidade física de um corpo. Assim, um material homogêneo terá seus constituintes distribuídos de forma, que em qualquer parte do corpo, as propriedades tenderão a ser representativas do corpo como um todo (Panitz, 2007). Já a isotropia é uma medida das propriedades direcionais do material, ou seja, o material terá a mesma propriedade independente da direção. E a continuidade se refere a características do material relacionado a juntas, trincas e porosidade. O grau de continuidade afetará a coesão de um corpo e conseqüentemente a transmissão da distribuição de tensões nesse mesmo corpo (Obert & Duvall, 1967).

As rochas e os solos têm algo de heterogêneo, anisotrópicas e descontínuas, logo é improvável que esses sejam perfeitamente elásticos. Entretanto, como comportamento elástico das rochas depende da orientação e da frequência dos cristais que as constituem (Anderson, 1989), um volume rochoso, composto por muitos cristais aleatoriamente orientados se aproximam das condições de isotropia, tornando satisfatória a aproximação isotrópica para as rochas da crosta e manto terrestres (Kulhánek, 1993; Turcotte & Schubert, 2002). Assim, da

mesma forma que um volume rochoso pode possuir características de um material isotrópico, um solo constituído por grãos aleatoriamente orientados pode também possuir um caráter majoritariamente isotrópico, comportando-se como um material elástico regido pelas leis da física e mecânica de materiais.

A relação, então, entre um conjunto de tensões aplicadas em um solo e suas deformações subsequentes no regime elástico podem ser mais bem entendidas e descritas pelo uso e aplicação dos módulos elásticos (Lopes, 2005). Esses são definidos como parâmetros físicos que descrevem o comportamento mecânico dos materiais e dependem, sobretudo de sua composição química, sua microestrutura e defeitos, como, por exemplo, trincas e microfraturas.

Conforme exposto por Ventura (2010), o comportamento elástico de um material é caracterizado por parâmetros elásticos como módulo de elasticidade ou Young (E), razão ou coeficiente de Poisson (ν), Módulo de Rigidez ou de Cisalhamento (G) e coeficiente volumétrico ou módulo de Bulk (K).

2.2.1.MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade ou de Young pode ser representado pela letra E ou pela Y, e é uma grandeza proporcional à rigidez de um material quando este é submetido a uma tensão de tração ou de compressão, sendo, então, a razão entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo material. Duarte (1997) cita que a mudança de comprimento de um corpo quando esse é submetido a uma tensão ou compressão está relacionado ao parâmetro elástico E.

Kulhánek (1993) apresenta que E pode ser calculado segundo **Equação 2.5**, onde, pela observação da **Figura 2.5**, l é o comprimento do cilindro e S é a área do corte transversal, que tenha uma extremidade fixa. A aplicação da força tracional F, paralela ao eixo do cilindro, ocasiona incremento de comprimento Δl .

$$E = \frac{\text{tensão tracional}}{\text{elongação axial}} = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (2.5)$$

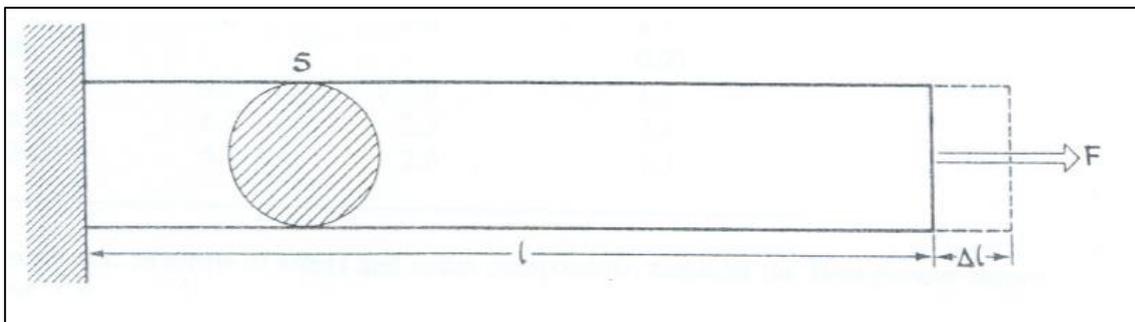


Figura 2. 5: Cilindro submetido a deformação axial por aplicação da força F (Kulhánek, 1993).

Duarte (1997) apresenta outra fórmula para o cálculo de E (**Equação 2.6**), onde ρ é a densidade, V_p é a velocidade de propagação da onda P e V_s é a velocidade de propagação das ondas S.

$$E = \rho \cdot V_s^2 \cdot \left(\frac{3V_p^2 - 2V_s^2}{V_p^2 - \frac{1}{3}V_s^2} \right) \quad (2.6)$$

2.2.2. COEFICIENTE DE POISSON

O coeficiente ou razão de *Poisson* mede a deformação transversal em relação à direção longitudinal de aplicação da carga. No caso da razão de *Poisson*, a razão estabelecida não é entre a tensão e a deformação, mas sim entre as deformações ortogonais. Esse parâmetro é comumente representado pela letra grega ν (*ípsilon*).

Kulhánek (1993) apresenta que a razão de *Poisson* pode ser calculada conforme a **Equação 2.7**, onde um cilindro de comprimento l e corte transversal de área S , que tenha uma extremidade livre sujeita a uma força tracional F , paralela ao eixo do cilindro, ocasiona uma contração Δd no diâmetro do cilindro (**Figura 2.6**).

$$\nu = - \frac{\text{contração radial}}{\text{elongação axial}} = \frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (2.7)$$

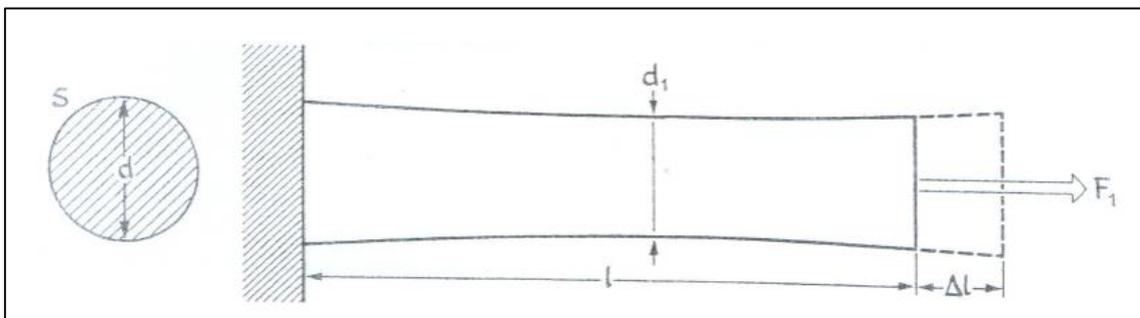


Figura 2. 6: Cilindro submetido a extensão longitudinal e contração lateral por aplicação da força F (Kulhánek, 1993).

Christensen (1996) mostra que a razão de poisson pode ser obtida por métodos sísmico sem ambiguidades, conforme **Equação 2.8**. Nessa equação V_p é a velocidade da onda P e V_s é a velocidade da onda S.

$$\nu = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \right] \quad (2.8)$$

2.2.3. MÓDULO DE CISALHAMENTO

O parâmetro elástico μ ou módulo de cisalhamento (G) mede a resistência do material ao esforço cisalhante (Sheriff e Geldart, 1982). Um esforço cisalhante está relacionado a uma tensão cisalhante, que pode ser explicada a partir de uma força aplicada paralelamente a uma superfície, com o objetivo de causar o deslizamento de planos paralelos uns em relação aos outros. Uma forma mais usual de representar essa relação é pela figura de um corpo tridimensional, o qual, quando submetido à forças tangentes a uma de suas faces, que tenha a face oposta fixa, mantém seu volume, mas não a sua forma (**Figura 2.7**).

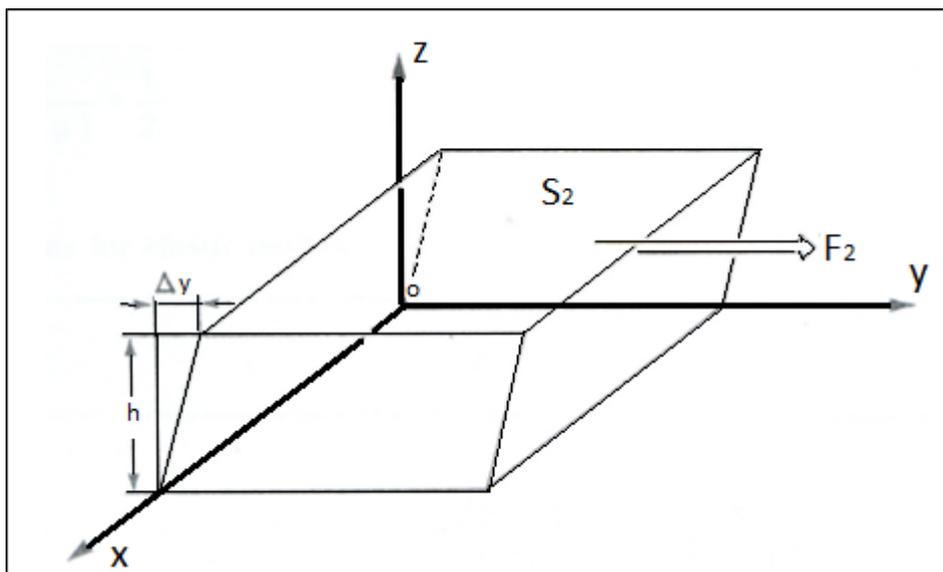


Figura 2. 7: Corpo tridimensional submetido a uma tensão cisalhante em sua face superior sofre deformação cisalhante (Kulhánek, 1993).

No caso apresentado, o módulo de cisalhamento é calculado pela **Equação 2.9**, onde F é a força tangencial, S é a área da face, Δy a distância horizontal pela qual as faces cisalhadas se deslocam e h é a altura do corpo.

$$\mu = G = \frac{\text{tensão cisalhante}}{\text{deformação cisalhante}} = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta y}{h}} \quad (2.9)$$

O módulo de cisalhamento, conforme apresenta Duarte (1997), é obtido também pela **Equação 2.10**, onde ρ é a densidade e a V_s é a velocidade da onda sísmica S .

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (2.10)$$

2.2.4. MÓDULO VOLUMÉTRICO

O módulo volumétrico ou de Bulk descreve a elasticidade volumétrica ou a tendência de um objeto de se deformar quando carregado em todas as direções ou, ainda, quantifica a incompressibilidade dos materiais (Sheriff e Geldart, 1982). É definido como tensão volumétrica sobre a deformação volumétrica, calculado conforme **Equação 2.11** (Kulhánek, 1993), onde F é a força normal, A é a área, ΔV é a variação de volume do corpo devido à deformação e V o volume do corpo (**Figura 2.8**).

$$K = \frac{\text{tensão volumétrica}}{\text{deformação volumétrica}} = -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}} = -\frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (2.11)$$

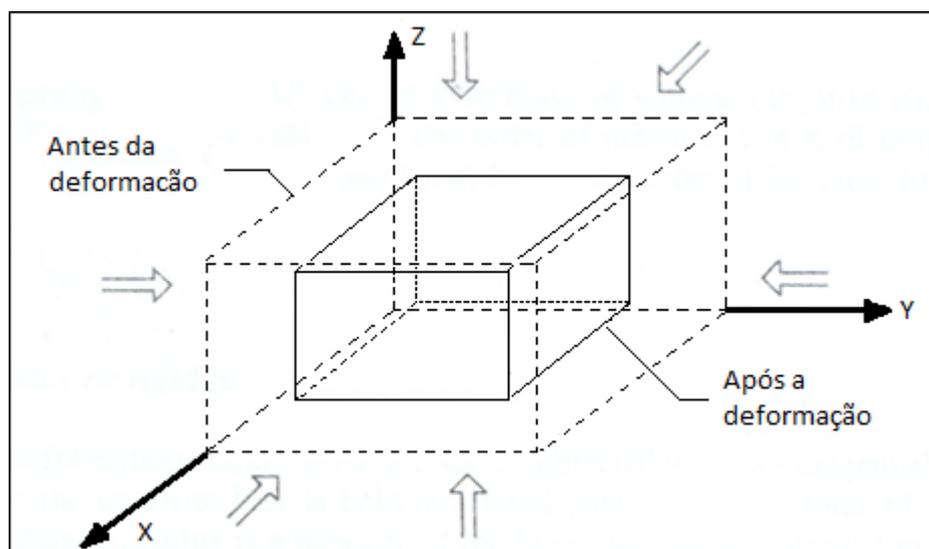


Figura 2. 8: Corpo tridimensional submetido a uma pressão hidrostática sofrendo deformação volumétrica (Kulhánek, 1993).

Ventura (2010) informa que o módulo de Bulk também pode ser calculado a partir da **Equação 2.12**.

$$K = \rho(Vp^2 - \frac{4}{3}Vs^2) \quad (2.12)$$

2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Estudos para caracterização geológico-geotécnica de um solo ou rocha, visa a descrição do comportamento mecânico e hidráulico de um maciço, seja para obras de engenharia, mineração, meio ambiente ou estudos acadêmicos.

Neste trabalho, não será abordado o tema relativo a classificações geotécnicas desenvolvidas no âmbito da mecânica de solos e geologia de engenharia, pois o cerne da

pesquisa é o uso da sísmica para medição de parâmetros que, em conjunto, possibilitam uma interpretação de solos e rochas independente da classificação, em seu sentido formal.

A base para caracterização de um maciço é a descrição dos aspectos ou características de interesse à elucidação do tipo de solo e seu comportamento. Essa descrição é realizada em cortes ou exposições do solo, escavações, sondagens, ensaios campo e de laboratório.

Nessa pesquisa são usadas diversas propriedades para descrever e, portanto, caracterizar o solo, a saber: textura, consistência, escavabilidade, resistência a compressão simples, resistência ao cisalhamento e resistência a compressão, ou resistência à mudança de volume. Assim, serão descritos a seguir os diferentes ensaios para obtenção das propriedades citadas, dando ênfase àqueles executados durante o desenvolvimento da pesquisa, que foram o ensaio de refração sísmica e o MASW.

2.3.1.DETERMINAÇÃO DA TEXTURA

Conforme já mencionado neste capítulo, a textura de um solo está diretamente relacionada à granulometria do mesmo. Assim, para que seja determinada a textura do solo, o mais adequado seria a realização do ensaio de análise granulométrica. Esse é um ensaio de laboratório, regido no âmbito nacional pela norma da ABNT NBR 7181:1984.

O ensaio de análise granulométrica é o processo utilizado para a determinação da percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. Essa informação é comumente representada por meio da curva de distribuição granulométrica (**Figura 2.9**).

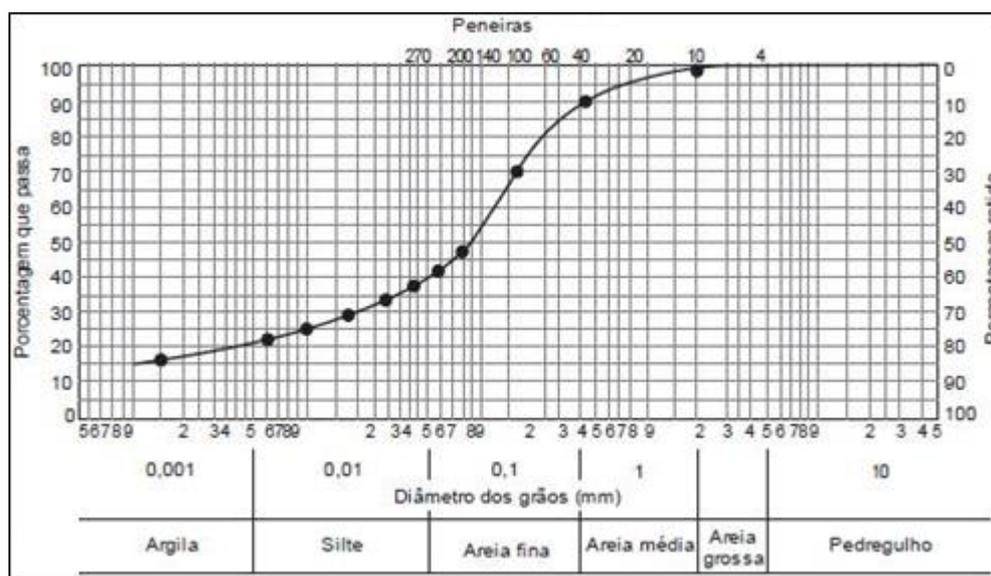


Figura 2. 9: Exemplo de uma curva granulométrica (Pinto, 2006).

O ensaio é realizado por meio de duas técnicas distintas e complementares: peneiramento e sedimentação. No peneiramento, o peso do material que passa em cada peneira é o percentual que passa, sendo representado na curva granulométrica em função da abertura da peneira (diâmetro da partícula) em escala logarítmica. A peneira de menor diâmetro empregada é aquela com a abertura de 0,075 mm. Na decantação, o material que passa a partir da peneira de 2,0 mm é imerso em água, sendo observada a velocidade de decantação das diferentes partículas que compõe material. Essa técnica se baseia na Lei de Stokes:

A velocidade de queda de partículas esféricas num fluido atinge um valor limite que depende do peso específico do material da esfera (γ_s), do peso específico do fluido (γ_w), da viscosidade do fluido (μ) e do diâmetro da esfera (D), conforme a **Equação 2.13**:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} \cdot D^2 \quad (2.13)$$

Assim, densidades de suspensão são medidas, por meio de um densímetro, em diferentes momentos e profundidades de decantação da amostra de sedimento no recipiente preenchido por água. Diversas leituras do densímetro, em diversos intervalos de tempo, determinarão igual número de pontos na curva granulométrica, complementando a curva obtida por peneiramento (Pinto, 2006).

Outra forma de se determinar a granulometria de um sólido, muito comum, mas um tanto subjetiva é por meio da identificação táctil visual. A identificação táctil visual é feito pelo manuseio do solo para “sentir” sua reação. Assim, na identificação, informa-se a cor, a sensação de aspereza e a plasticidade. Existem algumas formas de se realizar esses ensaios expeditos: moldar torrões do solo e verificar a resistência à pressão dos dedos; misturar uma porção do solo seco em recipiente transparente, agitar e depois observar a sedimentação dos grãos; esfregar uma pequena quantidade de solo úmido na palma da mão, colocá-la embaixo de uma torneira aberta e observar a facilidade com que a mão fica limpa; etc. Assim, são ensaios que podem ser utilizados do ponto de vista qualitativo e que dependem da experiência e percepção do profissional envolvido no levantamento.

2.3.2.DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA

Existem muitas formas de se determinar a consistência de um solo argiloso. Uma delas é pelo ensaio de resistência à compressão simples (ABNT NBR 12770:1992). Esse ensaio de laboratório é efetuado por meio de amostras de solo moldados na forma de um corpo de prova cilíndrico. Assim, o corpo de prova é acondicionado em equipamento que transfere a ele cargas resistivas (tensões) até que ocorra a ruptura. A maior tensão aplicada é a resistência à compressão simples, sendo os valores padrões apresentados na **Tabela 2.8**.

Além disso, segundo a ABNT NBR 6484:2001, a consistência das argilas e siltes argilosos podem ser correlacionáveis ao índice de resistência a penetração, obtido no ensaio “*Standard Penetration Test*” ou SPT. Essa correlação está apresentada na **Tabela 2.9**.

O ensaio SPT está normatizado no Brasil pela norma ABNT NBR 6484:2001, em termos de equipamentos e procedimentos. Este é um ensaio de campo, pelo método direto e consiste em três etapas distintas, repetidas metro a metro, a saber: perfuração, penetração e amostragem (Lukiantchuki, 2012). O ensaio é realizado na etapa de penetração, quando é determinado o índice de penetração do solo (NSPT).

Tabela 2. 8: Classificação das argilas segundo a consistência (Terzaghi e Peck, 1948).

Consistência	Resistência a Compressão Simples (kPa)
Muito mole	< 25
Mole	25 – 50
Consistência média	50 – 100
Rija	100 – 200
Muito rija	200 – 400
Dura	> 400

Tabela 2. 9: Consistência de argilas em função do NSPT (ABNT NBR 7250:1982).

NSPT (nº de golpes)	Consistência
≤ 2	Muito mole
3 a 5	Mole
6 a 10	Média
11 a 19	Rija
> 19	Dura

O ensaio SPT consiste na aplicação de golpes sucessivos de um martelo com massa conhecida (65 Kg), solto a uma altura de 0,75 metros, o que causa a cravação do amostrador padrão no solo, até a penetração de 45 centímetros. O índice NSPT corresponde ao número de golpes necessários para cravar os últimos 30 centímetros do solo amostrado (**Figura 2.10**).

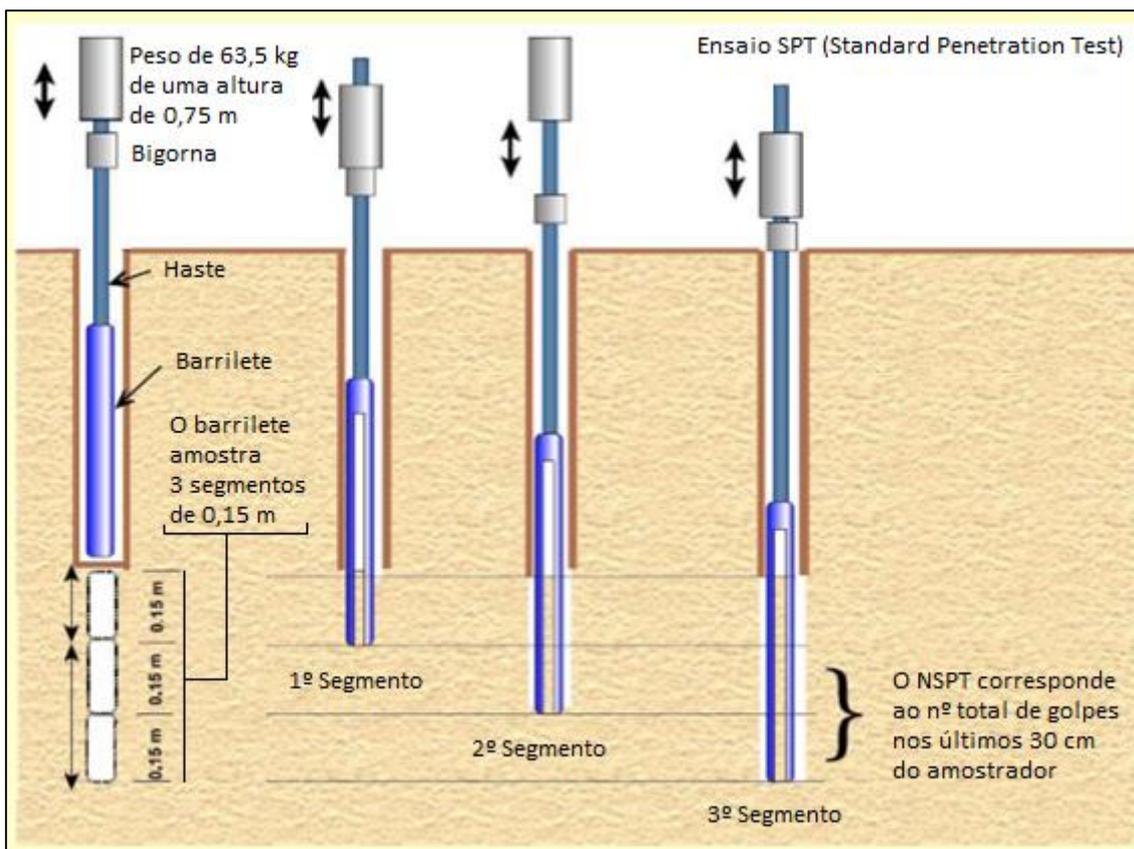


Figura 2. 10: Desenho esquemático do ensaio SPT (Penna, 2010).

2.3.3.DETERMINAÇÃO DA ESCAVABILIDADE

A escavabilidade é a maior ou menor facilidade de um maciço em ser escavado (Redaelli e Cerello, 1998). Não existe um ensaio específico para determinar essa propriedade dos solos e rochas, visto que a escavabilidade de um maciço depende de um conjunto de propriedades que juntas definirão a melhor forma de se proceder a escavação de um terreno. Dentre essas propriedades se destacam: dureza, tenacidade, resistência a tração e a compressão, densidade, impedância, empolamento e capacidade de carga.

Tal qual as outras propriedades expostas ao longo desse trabalho, a escavabilidade pode ser correlacionada a parâmetros como resistência a compressão uniaxial e velocidade de propagação das ondas P. Souza *et al.* (1998), expõe que a velocidade da onda P é proporcional à dificuldade de escavação de um maciço.

2.3.4.DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS ELÁSTICOS

Para a determinação dos parâmetros elásticos, os métodos empregados podem ser dinâmicos, a partir de vibrações com pequenas amplitudes de deformação, ou estáticos, por meio da utilização de corpos de prova e tensões induzidas. Podem também ser divididos em

ensaios de laboratório e de campo (geotécnicos e sísmicos). Aqui serão apresentadas as informações dos ensaios de campo.

2.3.4.1. ENSAIOS DE CAMPO

Os ensaios de campo medem as propriedades dinâmicas dos solos *in situ*, apresentando vantagens em relação aos de laboratório (Kramer, 1996; Pitilakis e Anastasiadis, 1998), pois não necessitam de amostragem, sem alterar as condições naturais do solo; medem a resposta de maiores volumes de solo e, portanto, aproximam-se à escala do maciço; e induzem no solo deformações da ordem de grandeza que se quer estudar. Entretanto, as trajetórias de tensões ou de tensões induzidas são estimadas e difíceis de se controlar.

Lopes (2005) destaca que os ensaios de campos podem ser divididos em ensaios com nível alto de distorção como o SPT, o Cone Penetration Test (CPT), o Pressiométrico e o Dilatométrico; e ensaios com nível baixo de distorção, como os ensaios sísmicos.

Para a obtenção das propriedades dinâmicas dos solos pelo ensaio SPT, são utilizadas correlações entre o valor N ou N_{60} (para solos arenosos considerando o efeito da profundidade) e a velocidade das ondas sísmicas, existindo várias correlações na literatura (Otha e Goto, 1976; Pinto, 2006). Na **Tabela 2.10**, Lopes (2005) apresenta diversas correlações entre o NSPT e a velocidade de propagação das ondas S (V_s).

Tabela 2. 10: Exemplo de relações entre N e V_s propostas por diferentes autores (Lopes, 2005).

Autor	Relação (V_s ; m/s)	Tipos de Solo
Imai (1997 <i>in</i> : Ansal <i>et al.</i> , 2003)	$V_s = 91N^{0,337}$	Todos
Imai (1997 <i>in</i> : Madiai, 1999; Ansal <i>et al.</i> , 2003)	$V_s = 102N^{0,29}$	Argila Holocênica
	$V_s = 81N^{0,33}$	Areia Holocênica
Imai (1997 <i>in</i> : Madiai, 1999)	$V_s = 114N^{0,29}$	Argila Pleistocênica
	$V_s = 97N^{0,32}$	Areia Pleistocênica
Sykora & Stokoe (1983 <i>in</i> : Ansal <i>et al.</i> , 2003)	$V_s = 100N^{0,29}$	Areia
Lee (1990 <i>in</i> : Madiai, 1999; Ansal <i>et al.</i> , 2003)	$V_s = 57,4N^{0,49}$	Areia
	$V_s = 105,6N^{0,32}$	Silte
	$V_s = 114,4N^{0,31}$	Argila
Iyisan (1996 <i>in</i> : Ansal <i>et al.</i> , 1997,2003)	$V_s = 51,5N^{0,516}$	Todos
Jinan (1987 <i>in</i> : Ansal <i>et al.</i> , 2003)	$V_s = 116,1(N=0,3185)^{0,202}$	Holocênico
Maugeri & Carrubba, 1997	$V_s = 48N^{0,55}$	Argila sobre consolidada
Fialho Rodrigues, 1979	$V_s = 81,39N^{0,34}$	Todos

O ensaio CPT é um ensaio geotécnico que consiste na cravação no solo de uma ponteira normalizada, a uma velocidade de 2 cm/s. Transdutores situados na ponta e na manga do cone medem a resistência a penetração (q_c) e o atrito lateral (f_s) durante a

penetração (ASTM D 3441-05). Mais parâmetros podem ser calculados com a inserção de transdutores para a medição da pressão intersticial, fazendo com que o ensaio passe a ser denominado de CPTU.

Em cada ensaio CPT é possível a caracterização de todo o perfil de solo atravessado, inclusive àqueles de pequenas dimensões não identificadas no ensaio SPT. A limitação desse ensaio está relacionada com a impossibilidade de realizá-lo em solos densos e rijos. O q_c pode ser correlacionado à V_s como apresentado na **Tabela 2.11**.

Tabela 2. 11: Exemplos de relações entre q_c e V_s (Lopes, 2005).

Autor	Relação (V_s: m/s)	Tipo de Solo
Sykora (1983 <i>in</i> : Ansal <i>et al.</i> , 2003)	$V_s = 134 + 0,52q_c$ (q_c : kg/cm ²)	Areia
Mayne & Rix (1995 <i>in</i> : Madiai, 1999)	$V_s = 1,75q_c^{0,627}$	Argila
Barrow & Stokoe (1983 <i>in</i> : Ansal <i>et al.</i> , 2003)	$V_s = 154 + 0,64q_c$ (q_c : kg/cm ²)	Todos
Iyisan (1996 <i>in</i> : Ansal <i>et al.</i> , 2003)	$V_s = 55,3 q_c^{0,337}$	Todos

O ensaio pressiométrico (PMT) consistem em uma sonda com um cilindro contendo uma membrana flexível que aplica uma pressão uniforme nas paredes de um furo, podendo ser executado em um furo preexistente ou por meio da cravação no solo (ABNT NBR 6122:2010). Durante o ensaio é medida a pressão aplicada e a expansão da membrana para se obter a resposta do solo às variações de pressão. Sendo possível a obtenção do módulo pressiométrico.

O ensaio Dilatométrico consiste em cravar uma lâmina de aço no solo, medindo-se a força atingida na cravação (ABNT NBR 6484:2001). Além disso, após a cravação, dilata-se uma membrana interna do equipamento em 1,1 mm na direção das paredes do furo, sendo registradas a pressão durante a cravação e a pressão no confinamento. Esse ensaio é utilizado para medição do módulo dilatométrico.

Os ensaios sísmicos são ensaios adequados para análise de níveis de distorção inferiores a 10⁻⁵% e se baseiam na propagação das ondas elásticas, sendo o processo de aquisição compostos essencialmente de três elementos: fonte da onda sísmica, receptores das ondas sísmicas e sistema de registro de ondas sísmicas (sismógrafo).

Os ensaios sísmicos são executados diretamente na superfície ou na parte interna de um furo de sondagem. Esses são comumente divididos ensaios de refração e de reflexão.

Para determinação de parâmetros elásticos, são indicados preferencialmente os métodos de refração. Os ensaios de sísmica de refração podem utilizar tanto a propagação das ondas de corpo como a propagação de ondas superficiais. A **Figura 2.11**, apresentada a seguir, mostra a configuração básica de uma aquisição sísmica de superfície.

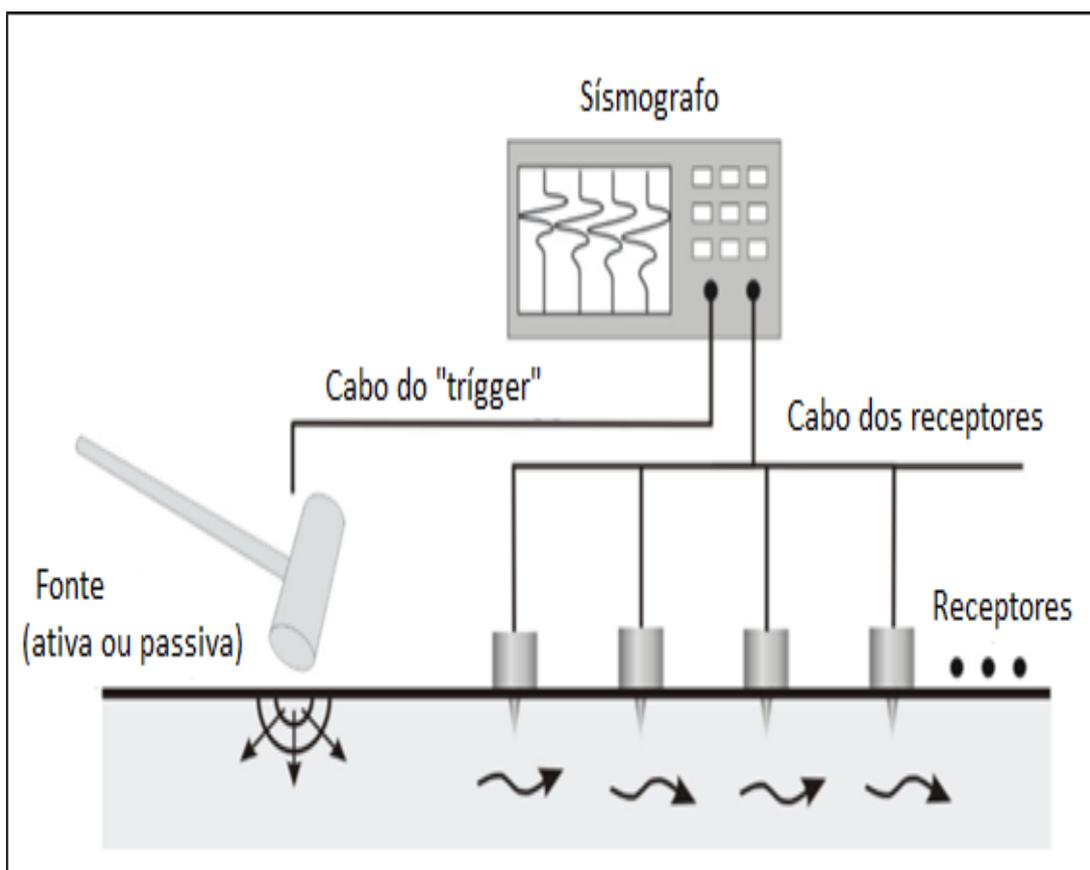


Figura 2. 11: Configuração básica de uma linha de aquisição sísmica de superfície (Lopes, 2005).

Ressalta-se que os ensaios de superfície serão tratados, em detalhe, em subitem posterior, considerando a relevância desses na pesquisa ora apresentada.

Os ensaios sísmicos em furos de sondagem podem ser entre furos (*crosshole*), em um furo com a fonte na superfície (*downhole*) e com a fonte no interior de um furo (*uphole*). Ensaios em furos são normatizados pela ASTM D 4428/D4428M-00.

Destaca-se, no entanto, que o ensaio *crosshole* é considerado o mais útil para a determinação dos parâmetros elásticos. Nesse ensaio são usados 2 ou mais furos de sondagem. Em um dos furos é colocada a fonte impulsiva e à mesma profundidade em outros furos os receptores ou geofones. Após a fixação dos geofones nas paredes dos furos, a fonte é acionada, sendo registrado o tempo de chegada das ondas sísmicas e o processo repetido a várias profundidades. Assim, obtém-se o perfil de velocidade sísmica em função da profundidade. O tempo de chegada é o da onda direta.

Como visto a medição das propriedades dinâmicas dos solos pode ser realizada por diferentes tipos de ensaios de laboratório e de campo, tendo Pitilakis e Anastasiadis (1998) discutido e comparado diferentes técnicas, conforme **Tabela 2.12**.

Tabela 2. 12: Ensaios para a determinação das propriedades dinâmicas dos solos (Pitilakis & Anastasiadis, 1998).

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
Pressiometro	B-A	C	C	-	-	-	-	-	B	propriedades dinâmicas
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
Refracção	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. Poucas medições. Classificação ainda impossível.							

2.4. MÉTODOS SÍSMICOS DE SUPERFÍCIE

As ondas sísmicas são ondas mecânicas de deformação elástica que se propagam radialmente a partir de uma fonte sísmica, como aquelas produzidas em terremotos (**Figura 2.12**) e explosões.



Figura 2. 12: Ondas sísmicas produzidas por um terremoto
(<http://www.educando.edu.do/articulos/estudiante/los-terremotos>, 2016).

Existem dois tipos de ondas sísmicas: as ondas de corpo (*body waves*) e as ondas de superfícies (*surface waves*).

As ondas de corpo transmitem energia ao meio em que se propagam e são representadas pelas ondas P e S. Nas ondas P, o movimento das partículas no meio é paralelo à sua direção de propagação. Já no caso das ondas S, o movimento das partículas é transversal à direção do movimento (Kearey *et al.*, 2009).

As ondas superficiais se propagam ao longo ou próximas à superfície, sendo representadas pelas ondas *Rayleigh* e *Love*. Nas ondas *Rayleigh* a propagação ao longo da superfície tem movimentos elípticos retrógrados, enquanto as ondas *love* tem movimentos paralelos à superfície e perpendicular à direção de sua propagação (Kearey *et al.*, 2009).

Os principais movimentos das ondas sísmicas são observados na **Figura 2.13**.

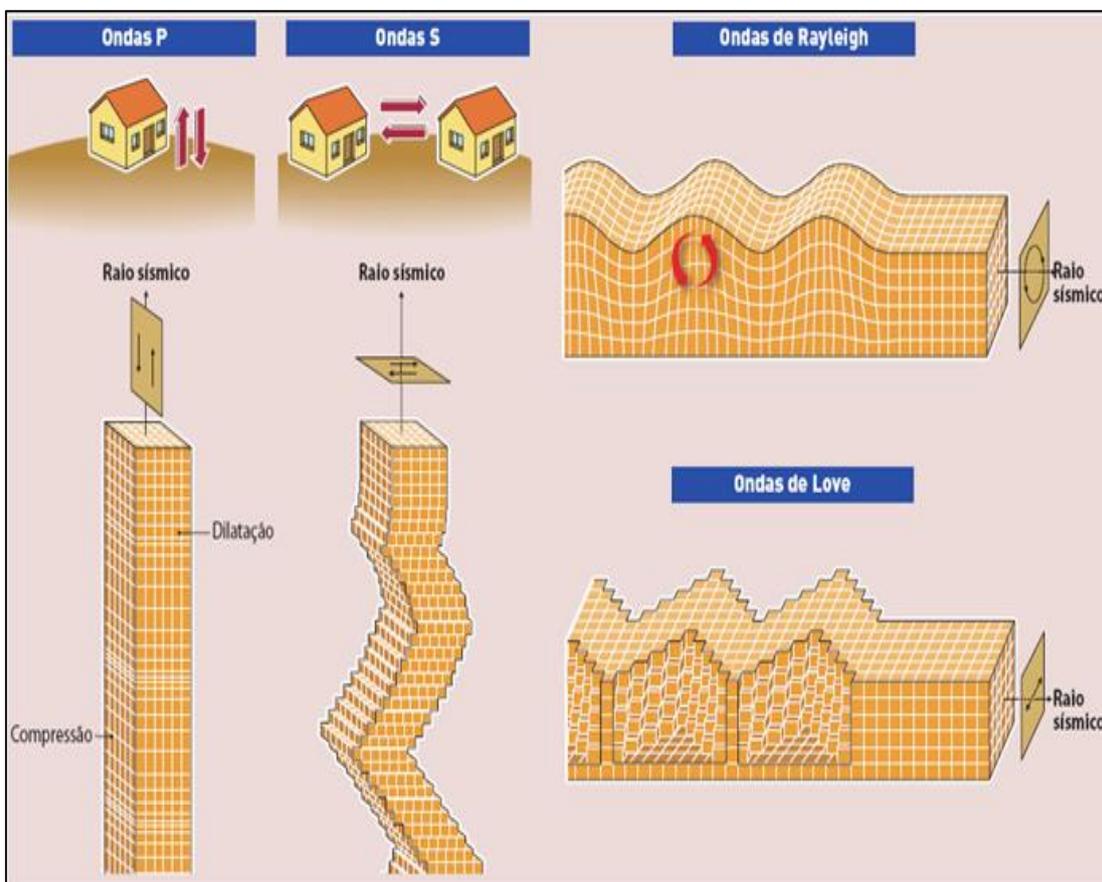


Figura 2.13: Diferentes formas de propagação das ondas sísmicas (<http://mybrainsociety.blogspot.com.br/2015/12/ondas-sismicas.html>).

Exceto nas proximidades da fonte, as deformações são consideradas elásticas, logo as velocidades de propagação dos pulsos sísmicos são determinadas pelos módulos elásticos e densidades dos materiais que essas ondas atravessam.

Assim, é possível representar a propagação da onda sísmica em um meio a partir de um raio sísmico. Esse raio incidirá com um ângulo θ_i com relação à normal (ângulo de incidência) na interface que separa dois meios com características distintas (**Figura 2.14**). Parte da energia transportada por esta onda será refletida com ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência, e outra parte será transmitida para o meio subjacente com um ângulo de transmissão θ_r (ângulo de refração) com relação a normal.

A relação entre os ângulos de incidência e de transmissão é representada pela Lei de Snell (**Equação 2.14**). A razão entre o seno do ângulo θ_i e a velocidade da camada superior é igual à razão entre o seno do ângulo de transmissão e a velocidade da camada inferior (Kearey *et al.*, 2009).

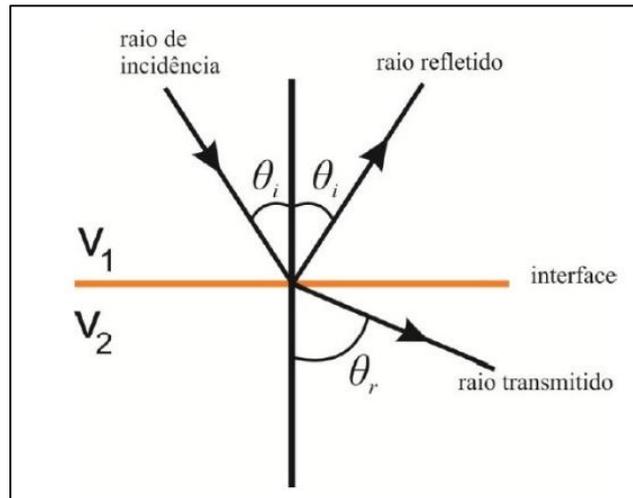


Figura 2. 14: Propagação teórica de uma onda sísmica em um meio (Kearey *et al.*, 2009).

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{v_1} = \frac{\text{sen } \theta_r}{v_2} \quad (2.14)$$

Quando a velocidade do meio inferior for maior que o meio superior, existirá um ângulo θ_i que resultará em um ângulo θ_r igual a 90° , este ângulo de incidência é chamado de ângulo crítico (θ_c). Assim, vale ressaltar que:

- quando o ângulo de refração é 90° , o raio refratado se propaga ao longo da interface entre a camada inferior e a superior com velocidade igual a camada inferior;
- qualquer θ_i maior que o θ_c resulta na reflexão total da energia incidente;
- quando a velocidade do meio inferior for menor que a velocidade do meio superior, o θ_r será menor que o θ_i , impossibilitando a existência de refração crítica.

Para o caso do ângulo crítico temos com o desenvolvimento da Lei de Snell a **Equação**

2.15:

$$\frac{\text{sen } \theta_c}{v_1} = \frac{\text{sen } 90^\circ}{v_2} \Leftrightarrow \frac{\text{sen } \theta_c}{v_1} = \frac{1}{v_2} \Leftrightarrow \theta_c = \text{sen}^{-1} \frac{v_1}{v_2} \quad (2.15)$$

Antes, porém, de tratarmos sobre os métodos de aquisição, considera-se importante a descrição de alguns conceitos básicos para o entendimento do comportamento das ondas sísmicas:

- O coeficiente de absorção (α) representa a fração de energia sísmica que se perde durante a transmissão em um meio pela distância equivalente a um comprimento de onda (λ) completo. Em geral, o pulso sísmico perde progressivamente seu conteúdo de frequências, em especial as de altas frequências. Por exemplo, o barulho gerado pelo trovão, quanto mais distante mais grave e com mais baixa intensidade será ouvido. Esta propriedade é observada quando da determinação da fonte mais adequada para execução de um levantamento sísmico.

- Quanto às amplitudes das ondas sísmicas, relativas aos pulsos transmitidos e refletidos, essas dependem da velocidade (v) e densidade (ρ) das duas camadas que definem a impedância acústica ($Z = \rho \cdot v$) do meio, sendo que as energias transmitidas e refletidas serão determinadas pelo contraste de Z na interface.
- O coeficiente de transmissão (T) é a razão entre a amplitude do raio transmitido e a amplitude do raio incidente (**Figura 2.15**).
- O coeficiente de reflexão (R) é a razão entre a amplitude do raio refletido e a amplitude do raio incidente.
- Uma forma de exprimir esses coeficientes é em termos de energia, pois nessas relações é comum que a maior parte da energia sísmica incidente numa interface de camadas seja transmitida e apenas uma pequena porção seja refletida, graças a isso, é viável o uso da energia sísmica para o levantamento de informações sobre as rochas e demais materiais constituintes de nosso solo e subsolo.
- Em camadas homogêneas de velocidade sísmicas v_1 e v_2 , separadas por uma interface horizontal a uma profundidade z , sendo v_1 menor que v_2 , uma fonte sísmica S gera ondas com 3 tipos principais de trajetórias que se propagarão de volta para a superfície a uma determinada distância da fonte (**Figura 2.16**): raios direto, refletidos e refratados.
- O raio direto viaja diretamente, através da camada superior, desde a fonte S até o receptor, à velocidade v_1 . O raio refletido incide obliquamente sobre a interface e é refletido de volta para o detector através da camada superior, deslocando-se ao longo de todo o seu trajeto à v_1 da camada superior. O raio refratado propaga-se para baixo e obliquamente à velocidade v_1 , depois ao longo de um segmento da interface à velocidade mais alta (v_2) e de volta para cima através da camada superior à velocidade v_1 (Kearey *et al.*, 2009).

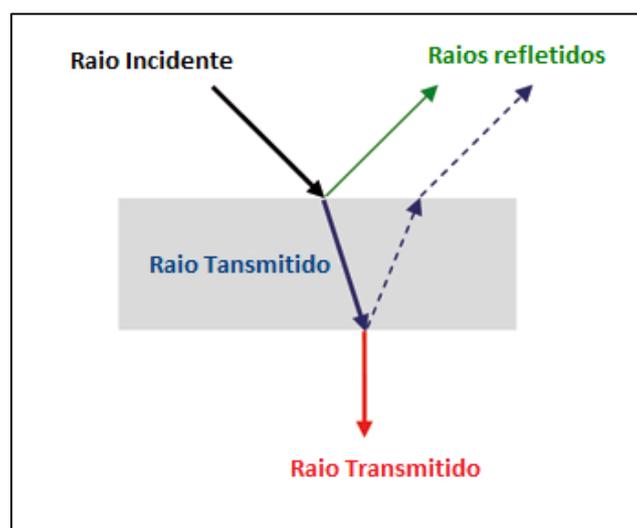


Figura 2. 15: Trajetórias dos raios incidente, transmitido e refletido.

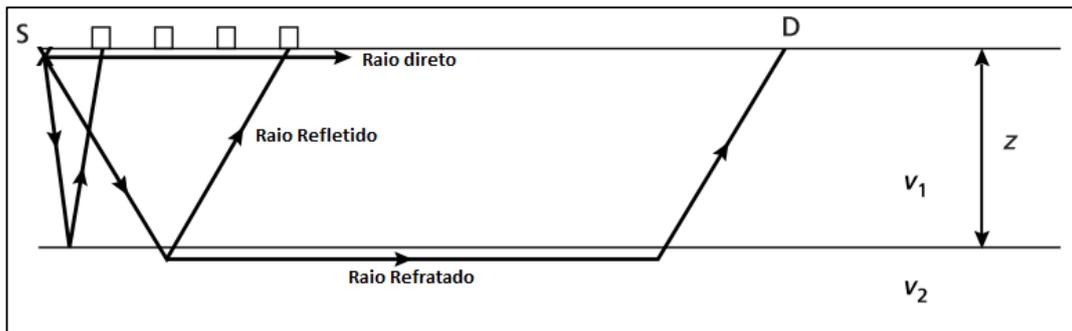


Figura 2. 16: Trajetórias dos raios direto, refletido e refratado criticamente (Kearey *et al.*, 2009).

- O tempo de percurso do raio direto é dado simplesmente pela distância medida em relação à fonte e a velocidade da camada superior, que define uma reta cuja inclinação será $1/v_1$, reta essa que passa pela origem do gráfico tempo-distância (Figura 2.17). O tempo de percurso do raio refletido é dada pela equação da hipérbole e o tempo do raio refratado é dado pela equação de uma reta, cuja inclinação será $1/v_2$ e sua intersecção pode ser calculada ou determinada diretamente no gráfico tempo-distância, pela interpolação da reta obtida no eixo representa o tempo.
- A partir da curva de tempo de percurso para os raios refletidos ou refratados é possível, por meio de relações matemáticas, obter a profundidade das camadas ultrapassadas pelas ondas sísmicas, ao menos por dois métodos de aquisição sísmica, uma utiliza as ondas refletidas e outra as refratadas.

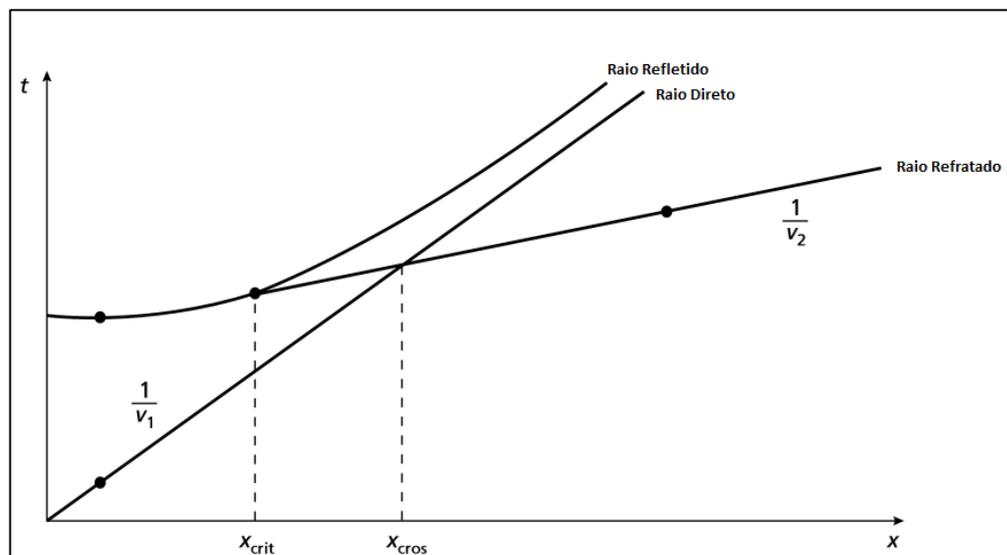


Figura 2. 17: Curvas do tempo de percurso para os raios, direto, refletido e refratado (Kearey *et al.*, 2009).

- A primeira chegada da energia sísmica desde uma fonte a um detector de superfície, posicionado a uma certa distância dessa fonte, sempre será primeiramente por meio de um raio direto ou um raio refratado.
- A distância em que o raio direto é ultrapassado pelo raio refratado é denominada de *x*cross. Essa relação pode ser verificada no gráfico tempo x distância, conforme representada na **Figura 2.17**.
- Como os raios criticamente refratados viajam para baixo em direção à interface segundo ângulo crítico, haverá sempre uma distância dentro da qual a energia refratada não atingirá a superfície, conhecida como distância crítica (*x*crit);
- Em uma aquisição de dados sísmicos pelo método de refração, os intervalos de registro de tempo de percurso devem ser grandes o suficiente para assegurar que a distância *x*cross tenha sido ultrapassada, de forma que os raios refratados possam ser detectados como primeira chegada. Além disso, quanto mais profunda estiver interface refratora, maior deve ser a distância de afastamento entre a fonte e o primeiro detector de uma linha sísmica.
- Em uma aquisição de dados sísmicos de reflexão se espera que as amplitudes sejam muito baixas, pois os refletores geológicos tendem a possuir coeficientes de reflexão muito baixos. Uma consequência é que as reflexões são normalmente mascaradas nos registros sísmicos, por eventos de amplitudes mais altas, como as dos raios diretos e refratados.
- O que se mede em um levantamento sísmico é o movimento do terreno causado por uma fonte de energia sísmica de localização conhecida. Esse movimento ao longo do tempo é registrado graficamente, gerando um sismograma.

2.4.1.MÉTODO: SÍSMICA DE REFRAÇÃO

O método sísmico de refração utiliza a refração crítica da onda sísmica nas interfaces de materiais com propriedades distintas para caracterização do meio. Esse método é bastante utilizado em estudos dos solos e rochas. Para o estudo dos solos, usa-se o que se denomina de sísmica rasa. No caso dos estudos das rochas, em geral, utiliza-se a sísmica profunda, usada especialmente para estudos das estruturas da litosfera (Ventura *et al.*, 2011). No presente trabalho será aplicada a refração sísmica rasa.

Segundo Nogueira, 2014, a sísmica de refração possui baixa resolução, necessidade de aumento da velocidade sísmica com a profundidade para que ocorra a refração crítica, grande razão entre o tamanho linha e a profundidade de investigação. Tais elementos constituem os principais limitantes do uso desse método de aquisição geofísica.

Nogueira (2014) destaca que a sísmica de refração é recomendada para locais com camadas horizontalizadas e com bom contraste de velocidades, sendo adequada para

determinação de embasamentos, localização de paleocanais, determinação da composição das rochas e identificação de estruturas de engenharia.

Nesta pesquisa, o uso da sísmica de refração tem o objetivo principal de se obter a velocidade das ondas P (V_p) e sua posterior utilização em correlações específicas e cálculo dos parâmetros elásticos de solo.

No método de refração sísmica, as ondas sísmicas são geradas a partir de uma fonte controlada. Essas se propagam em subsuperfície e retornam à superfície por refração crítica. Para medir a vibração gerada pela passagem das ondas sísmicas são utilizados instrumentos (geofones) distribuídos ao longo da superfície. Esses detectam o movimento do terreno causado pelas ondas que retornam. Medem-se, então, os tempos de chegada a diferentes afastamentos em relação à fonte. Esses tempos de percurso podem ser convertidos em valores de profundidade, que são atribuídos à variação e distribuição de interfaces geológicas e pedológicas.

Para a conversão de oscilações do terreno em sinais elétricos são requeridos transdutores (geofones) que sejam sensíveis aos componentes desses movimentos e, assim, ser possível registrar o intervalo de frequências e amplitudes necessárias com o mínimo de distorções. Com a oscilação do solo é possível medir tanto a amplitude do deslocamento quanto a velocidade ou a aceleração das partículas do solo quando da passagem da onda.

O movimento do solo se dá em três dimensões principais: vertical, transversal e horizontal, entretanto, em geral, mede-se a componente de movimento do solo. O registro do movimento do terreno no tempo constitui um sismograma, que é a informação básica utilizada no método.

Kearey *et al.* (2009) descreve que o método de refração sísmica está baseado em simples relações geométricas e trigonométricas relacionadas com a trajetória de propagação dos raios sísmicos em um meio estratificado. Assim, torna-se possível o desenvolvimento de equações, nas quais se calculam o tempo de percurso da onda sísmica refratada e as espessuras das diferentes camadas que compõem o meio investigado. A seguir são apresentados os diferentes modelos de análise.

- Duas camadas com uma interface horizontal:

Nesse modelo, considera-se que o meio é um maciço com duas camadas com velocidades distintas, sendo V_1 a velocidade da 1ª camada e V_2 a velocidade da 2ª camada. Considera-se, ainda, que a velocidade V_1 é menor que a velocidade V_2 e que essas camadas são separadas por uma interface horizontal (**Figura 2.18**).

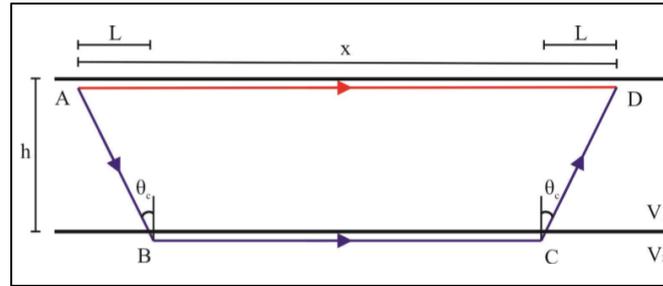


Figura 2. 18: Trajetória dos raios direto (vermelho) e refratado (azul), da fonte A ao receptor D, onde $V_1 < V_2$ e L é a projeção dos segmentos AB e CD na superfície (Kearey *et al.*, 2009 *apud* Nogueira, 2014).

Nos segmentos AB e CD, os raios refratados se propagam a velocidade V_1 e no segmento BC a onda viaja com a velocidade V_2 , conforme pode ser observado na **Figura 2.18**. Assim, o tempo total de percurso pode ser calculado conforme a **Equação 2.16**, exposta a seguir:

$$t = t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} = \frac{AB}{V_1} + \frac{BC}{V_2} + \frac{CD}{V_1} \quad (2.16)$$

A partir de relações trigonométricas entre a espessura (h) e a trajetória do raio na camada superior, podem-se deduzir as **Equações 2.17 e 2.18**, resultando nas **Equações 2.19 e 2.20**. Ou seja:

$$AB = CD = h \cos(\theta_c) \quad (2.17)$$

$$L = h \tan(\theta_c) \quad (2.18)$$

Dessa forma:

$$BC = x - 2L \quad (2.19)$$

$$t = \frac{2h}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{x - 2h \tan(\theta_c)}{V_2} \quad (2.20)$$

Pelo rearranjo da **Equação 2.20**, colocando o $2h$ em evidência (**Equação 2.21**) e usando a relação $\tan(\theta_c) = \frac{\sin \theta_c}{\cos \theta_c}$, obtêm-se a **Equação 2.22**. Ou seja:

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2h}{V_1 \cos \theta_c} - \frac{2h \tan(\theta_c)}{V_2} \quad (2.21)$$

$$t = \frac{x}{V_2} + 2h \left(\frac{V_2 - V_1 \sin(\theta_c)}{V_1 V_2 \cos(\theta_c)} \right) \quad (2.22)$$

Para que se possa obter o tempo de percurso a partir das velocidades, usa-se a Lei de Snell (**Equações 2.23 e 2.24**) e substitui os $\sin(\theta_c)$ e o $\cos(\theta_c)$, chegando nas **Equações 2.25 e 2.26**. Assim:

$$\text{sen}(\theta_c) = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.23)$$

$$\cos(\theta) = \sqrt{1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2} \quad (2.24)$$

Substituindo na forma já citada, têm-se, então:

$$t = \frac{x}{v_2} + 2h \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{v_2 v_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$

$$t = \frac{x}{v_2} + t_i \quad (2.26)$$

Essa última equação, que é uma equação da reta, correlaciona o tempo com a distância, sendo o coeficiente angular igual ao inverso da velocidade da segunda camada ($1/v_2$) e o coeficiente linear igual ao tempo de interceptação (t_i). Esse pode ser obtido no sísmograma pelo prolongamento, até o eixo dos tempos, da reta que se ajusta os tempos da onda refratada (**Figura 2.19**).

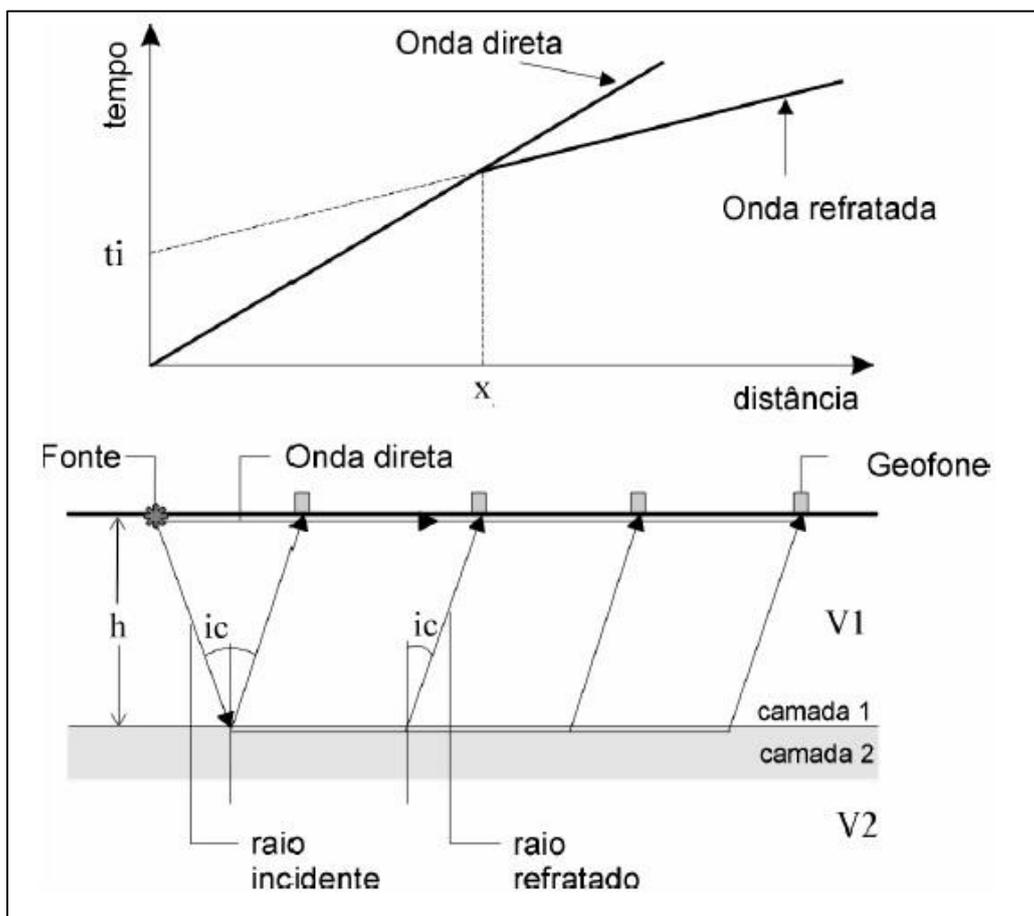


Figura 2. 19: Princípio básico da sismica de refração no modelo de duas camadas (Fonte: Giacheti *et al.*, 2006).

Considerando que t_i pode ser representado pela **Equação 2.27**, pode-se reordenar essa equação na forma da **Equação 2.28** e, assim, obter a espessura da 1ª camada ou a profundidade da interface entre a 1ª e 2ª camada. Ou seja:

$$t_i = 2h \left(\frac{(v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}}{v_2 v_1} \right) \quad (2.27)$$

$$h = \frac{t_i v_1 v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (2.28)$$

- Três ou mais camadas com interfaces horizontais:

Kearey *et al.*, (2009), levando em conta os mesmos princípios usados no modelo de duas camadas, define que a equação do tempo de percurso de um raio criticamente refratado pode ser estimada por meio da **Equação 2.29**, considerando a **Equação 2.30**.

$$t_n = \frac{x}{v_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2h_i \cos \theta_{in}}{v_i} \quad (2.29)$$

Onde:

$$\theta_{in} = \sin^{-1} \left(\frac{v_1}{v_n} \right) \quad (2.30)$$

Desta forma, para se estimar o t_i no modelo de três camadas, decorreria simplesmente no desenvolvimento da **Equação 2.29**, na forma exposta na **Equação 2.31**.

$$t_i = \frac{2h_1 \cos(\theta_{13})}{v_1} + \frac{2h_2 \cos(\theta_{23})}{v_2} \quad (2.31)$$

- Interfaces não planas:

Em geral, na natureza as interfaces entre as camadas não são horizontais, possuindo uma inclinação em relação a um plano horizontal. Para tal situação, o ângulo de mergulho da camada interfere no percurso da onda refratada, sendo considerado no cálculo do tempo de percurso.

No gráfico tempo versus distância, a velocidade não representaria mais a velocidade real do refrator e sim uma velocidade aparente (**Figura 2.20**). Essa será menor que a velocidade real quando registrada no sentido oposto ao mergulho da camada e maior quando for registrada no sentido do mergulho.

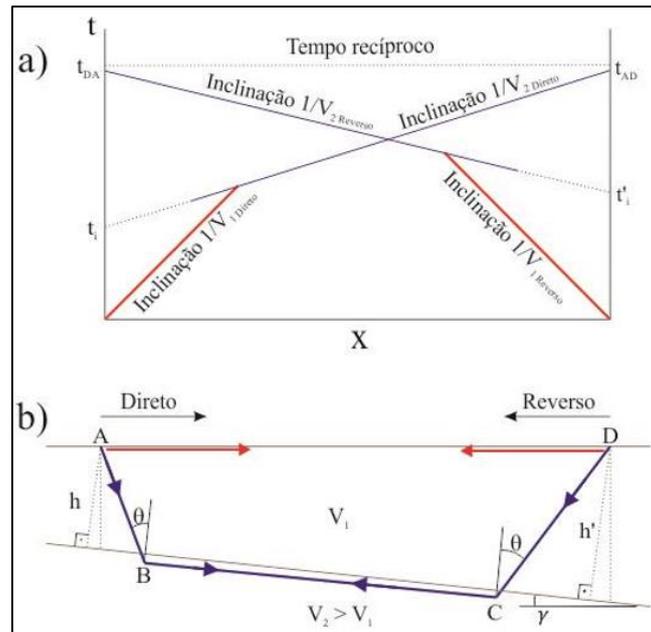


Figura 2. 20: Modelo de duas camadas com interface inclinada em relação a superfície e velocidade $V_2 > V_1$. a) Curvas tempo versus distância para os dois sentidos de mergulho. b) Trajetória dos raios refratados (Kearey *et al.*, 2009, *apud* Nogueira, 2014).

Para se determinar se uma camada é inclinada, é necessária a utilização de dois pontos de tiros opostos, assim, Kearey *et al.* (2009), descreve que nesse caso o ângulo θ deve ser substituído pelos ângulos α e β , incluindo o componente de inclinação da camada refratora. Nessa situação o tempo de percurso é dado pela **Equação 2.32**.

$$tn = \frac{x \operatorname{sen} \beta_1}{v_1} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i (\cos \alpha_i + \cos \beta_i)}{v_i} \quad (2.32)$$

Onde h_i é a espessura da camada i , e α_i e β_i são os ângulos em relação à vertical do raio descendente e ascendente respectivamente.

- Interfaces irregulares:

As interfaces irregulares são as que mais se assemelham às condições reais do terreno, sendo necessário o uso de métodos computacionais para o cálculo da interface, como por exemplo o método dos mínimos quadrados.

Para se calcular simultaneamente as espessuras das camadas logo abaixo dos receptores é necessário definir a vagarosidade (S) como o inverso da velocidade e, assim, linearizar a equação de tempo de percurso e facilitar os cálculos.

Para se calcular a velocidade de um maciço com duas camadas, consideram-se as vagarosidades, conforme as **Equações 2.33 e 2.34**.

$$S1 = \frac{1}{v_1} \quad (2.33)$$

$$S2 = \frac{1}{v_2} \quad (2.34)$$

Logo, substituindo a velocidade pela vagarosidade na equação de tempo de percurso, tem-se **Equação 2.35** e, pela substituição do $S1 \cos\theta c$ por uma constante c , resulta na **Equação 2.36**.

$$t = xS2 + 2h S1 \cos\theta c \quad (2.35)$$

$$t = xS2 + 2hc \quad (2.36)$$

Como para interfaces não regulares o h não é constante, substitui-se, portanto, o h na **Equação 2.36** da maneira apresentada na **Equação 2.37**. Dessa forma, o h_1 e h_2 representam as espessuras das extremidades do seguimento ao longo da interface irregular abrangida pelo par fonte-receptor, conforme Kearey *et al.* (2009) ilustra na **Figura 2.21**.

$$t = xS2 + h_1c + h_2c \quad (2.37)$$

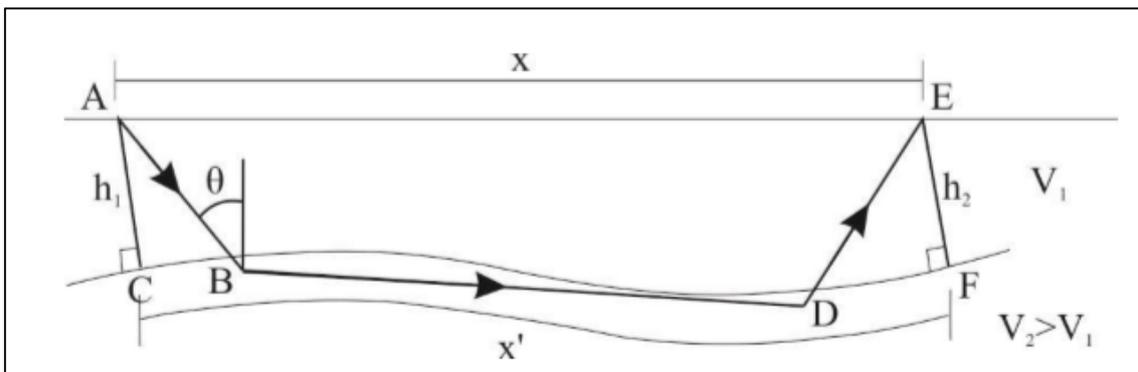


Figura 2. 21: Propagação de raio sísmico e sua refração em uma interface irregular (Kearey *et al.*, 2009, *apud* Nogueira, 2014).

- Subsuperfícies não ideais:

Subsuperfícies não ideais são aquelas não identificadas pelo método por não ter ocorrido de fato a refração ou por essa não ter se tornado visível.

O primeiro caso é denominado de camada cega e ocorre quando essa possui velocidade menor que a camada sobrejacente. O segundo caso é denominado de camada oculta e ocorre quando a espessura da camada é fina o suficiente para os raios sísmicos das camadas mais profundas chegarem antes dos raios refratados nessa camada. Ambos os casos são apresentados nas **Figuras 2.22 e 2.23** respectivamente.

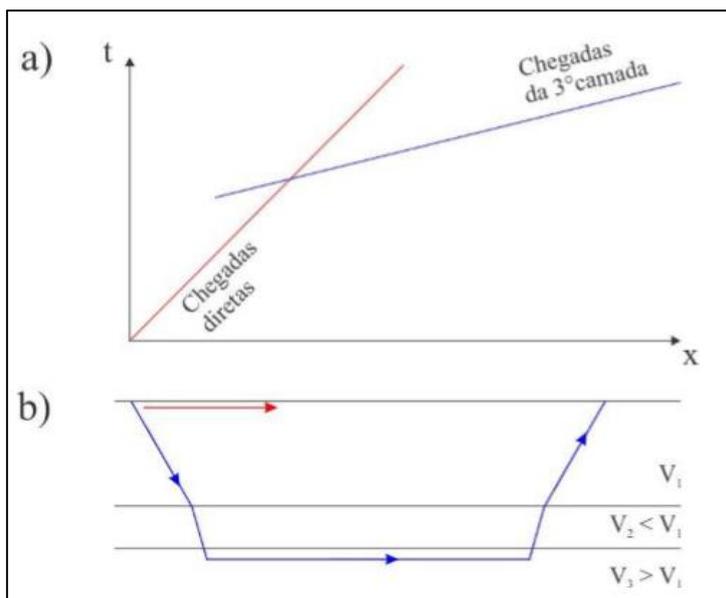


Figura 2. 22: Exemplo de camada cega: a) gráfico tempo versus distância. b) propagação dos raios direto e refratado. (Kearey *et al.*, 2009).

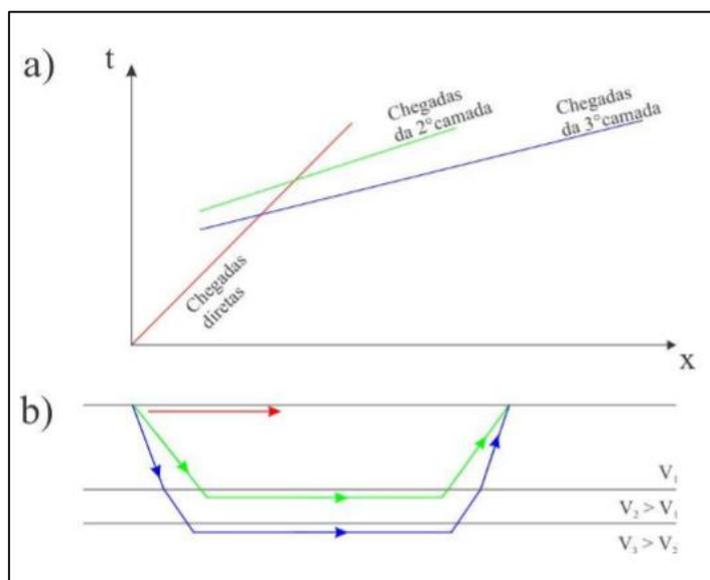


Figura 2. 23: Exemplo de camada oculta: a) gráfico tempo versus distância. b) propagação dos raios direto e refratado. (Kearey *et al.*, 2009).

2.4.2.MASW

A técnica MASW é a evolução da técnica de campo denominada de SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*), desenvolvido por Nazarian e Stokoe (1984). Esse método de campo não invasivo se baseia na característica dispersiva da propagação das ondas superficiais em meios estratificados, no qual a velocidade de propagação da onda S é obtida indiretamente a partir da velocidade de propagação da onda Rayleigh (Apaza e Barros, 2010).

No SASW são utilizados dois geofones, exigindo a repetição do ensaio em vários espaçamentos entre esses geofones para obtenção do perfil do solo. No MASW, por sua vez, utiliza-se múltiplos geofones, geralmente entre 24 a 48 canais, fazendo com que a obtenção do perfil seja mais fácil e rápida. Strobbia (2003) apresenta o ensaio na **Figura 2.24**, com base nos 3 passos principais sintetizado por Foti (2000):

- Perturbação na superfície a partir de uma fonte impulsiva e registro das ondas superficiais em sismogramas (dados brutos);
- Processamento para a elaboração das curvas de dispersão (velocidade de fase e de grupo, e frequência);
- Inversão dos dados por meio de um modelo estimado produzindo respostas sobre as propriedades das camadas como espessura, densidade e velocidade das ondas S.

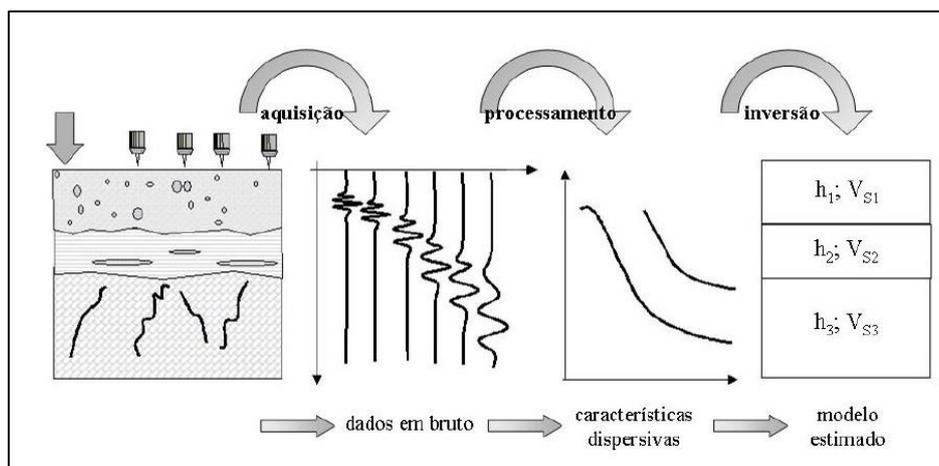


Figura 2. 24: Os três passos principais do método de ondas superficiais (Strobbia, 2003).

Conforme já apresentado neste capítulo, a aplicação de esforços na superfície de um terreno produz deformações que se propagam pelo meio na forma de ondas (Strobbia, 2003). Quando o meio é delimitado por uma superfície livre, são geradas ondas superficiais que se propagam próximo a superfície, em frentes cilíndricas que induzem o movimento das partículas. Essas ondas possuem amplitudes mais altas, aproximadamente 2/3 de toda a energia produzida, e velocidades mais baixas que as ondas de corpo (**Figura 2.25**).

Dentre as ondas de superfície, interessa particularmente as ondas Rayleigh, que possuem movimento de propagação elíptico retrógrado em relação a um plano vertical (**Figura 2.26**), sendo o maior eixo da elipse o vertical, e o menor aquele na direção de propagação da onda. Em maiores profundidades o movimento se torna cada vez mais prógrado (Lay e Wallace, 1995).

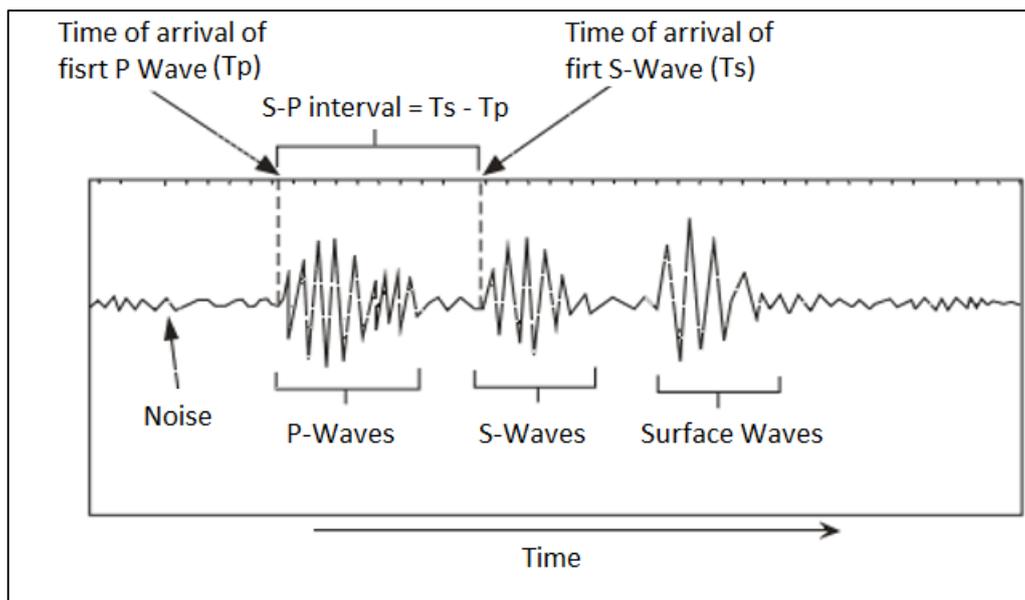


Figura 2. 25: Tempo de chegadas dos diferentes tipos de onda em um sismograma (Tulane, 2012).

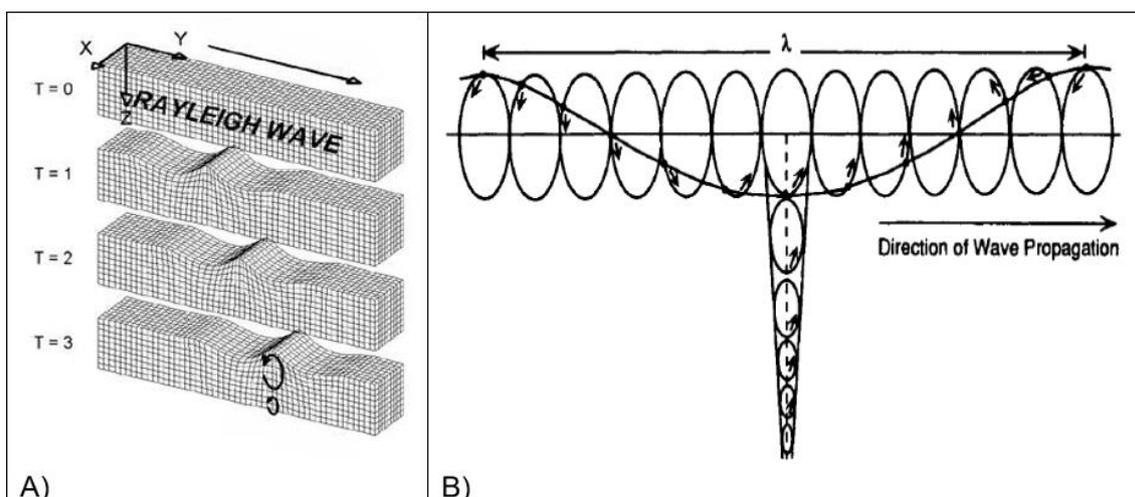


Figura 2. 26: Propagação das ondas Rayleigh: A) propagação em 3 dimensões (Strobbia, 2003). B) movimentação das partículas pela passagem da onda Rayleigh (Lay e Wallace, 1995).

Quanto à velocidade, Lopes (2005) apresenta que a velocidade de propagação da onda Rayleigh (V_r) pode ser determinada pela **Equação 2.38**:

$$K = \frac{V_r}{V_s} \quad (2.38)$$

Onde K é uma função do coeficiente de Poisson, podendo ser aproximado, conforme a **Equação 2.39**:

$$K = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad (2.39)$$

E, na qual o K varia da seguinte forma: $0,87 < K < 0,96$ para valores de $0 < \nu < 0,5$, sendo essa relação apresentada na **Figura 2.27**. Stokoe (1994) descreve simplesmente a V_r como sendo aproximadamente 92% da V_s .

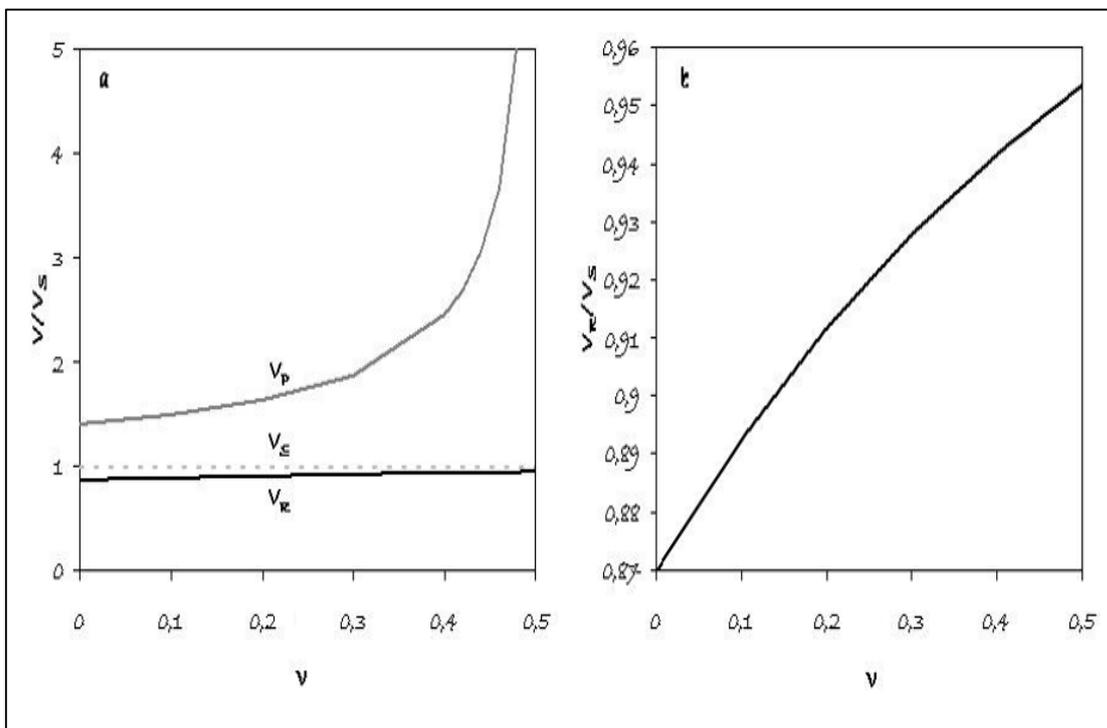


Figura 2. 27: Relação entre a velocidade de propagação das ondas de corpo e a onda Rayleigh (Richart *et al.* (1970); Strobbia 2003a *apud* Lopes, 2005).

Stokoe (1994) define o fenômeno da dispersão da seguinte forma: diferentes frequências possuem diferentes velocidades de fase, e atingem diferentes profundidades de propagação, com a amostragem de diferentes materiais. Este fenômeno pode ser observado na **Figura 2.28**.

Assim, em um meio estratificado, verticalmente não homogêneo, as ondas superficiais se propagarão com diferentes velocidades de fase, fazendo com que o meio tenha uma velocidade de fase em função da frequência. Essa função é representada graficamente por gráficos de velocidade de fase versus frequência (**Figura 2.29**).

A velocidade de fase, na qual a maior parte da energia se propaga, é obtida a partir de curva denominada de dispersão. Santa Rosa (1989) define a velocidade de grupo como o registro no sismograma $f(t)$ formado pelo harmônico fundamental registrado a uma distância r e azimute θ a partir de uma fonte. Dessa forma, a transformada de Fourier de $f(t)$, pelas condições impostas na **Equação 2.39**, é dada pela **Equação 2.40**.

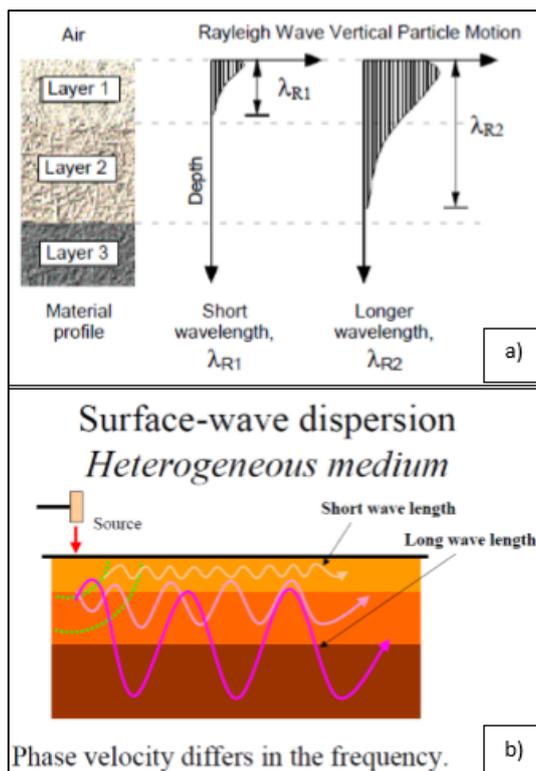


Figura 2. 28: a) Penetração de distintos comprimentos de ondas Rayleigh (Geovision, 2015). b) Propagação de diferentes comprimentos de onda (Hayashi, 2003).

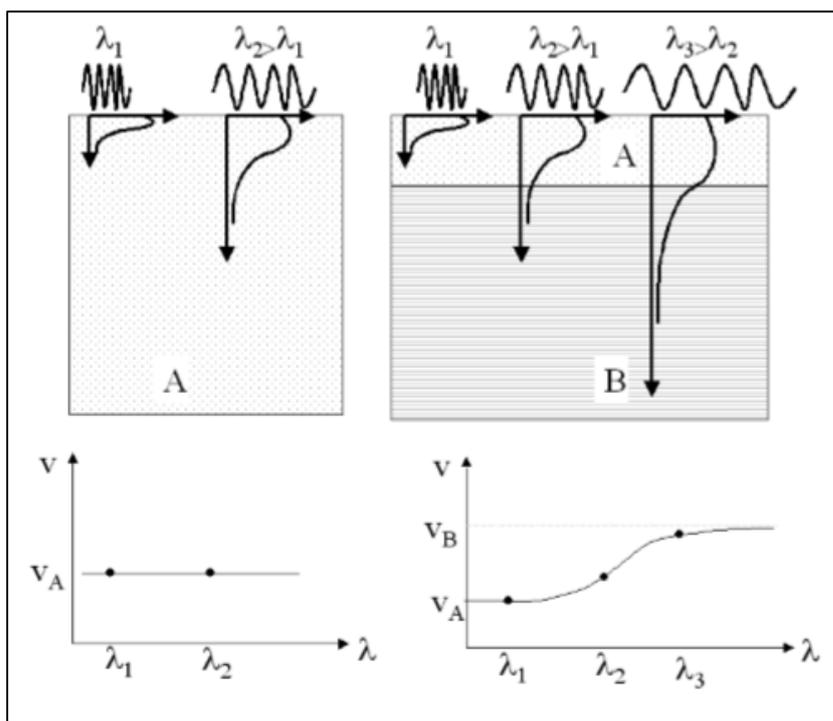


Figura 2. 29: A) Ondas Rayleigh em um meio homogêneo, a velocidade de fase constante. B) Ondas Rayleigh em um meio estratificado, diferentes comprimentos de onda amostram diferentes materiais e geram diferentes velocidades de fase (Strobbia, 2003).

$$f(t) = 0, \text{ para todo } t < 0 \quad (2.39)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{i\omega t} d\omega \quad (2.40)$$

Onde reescrevendo essa equação na forma de amplitude e fase, teremos a **Equação 2.41**, sendo A, a amplitude, ϕ , a fase, e ω , a frequência angular.

$$F(\omega) = A(r, \theta, \omega) \cdot e^{i\phi_1(r, \theta, \omega)} \quad (2.41)$$

A fase pode ser expressa pela **Equação 2.42** (Santa Rosa, 1989), sendo o $k(\omega)$ o número de onda.

$$\phi = (r, \theta, \omega) = k(\omega) \cdot r + (\theta, r) + (\omega) \quad (2.42)$$

Considerando a deconvolução prévia do efeito da fonte e do instrumento, restará apenas a resposta do meio, sendo possível a análise dispersiva desse mesmo meio a partir da **Equação 2.43**.

$$F(\omega) = A(r, \theta, \omega) \cdot e^{ik(\omega)r} \quad (2.43)$$

Por meio da transformada inversa de Fourier se tem a representação do efeito devido a uma fonte pontual, conforme pode ser observado na **Equação 2.44**.

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(r, \theta, \omega) \cdot e^{i(\omega t - k(\omega)r)} d\omega \quad (2.44)$$

Para a definição da velocidade de fase, considera-se que a velocidade de propagação de uma onda de frequência angular (ω) é calculada a partir do expoente da **Equação 2.44**, tendo Santa Rosa (1989) estabelecido a condição apresentada na **Equação 2.45**.

$$\omega \cdot t - k(\omega) \cdot r = \text{constante} \quad (2.45)$$

Deriva-se a **Equação 2.45**, temos a **Equação 2.46**.

$$\omega \cdot \left(\frac{dt}{dr} \right) - k(\omega) = 0 \quad (2.46)$$

A velocidade de fase sendo definida como $c(\omega)$ para uma frequência qualquer ω_n , tem-se a **Equação 2.47**, onde $\omega = \omega_n$.

$$c(\omega) = \frac{dr}{dt} = \frac{\omega}{k(\omega)} \quad (2.47)$$

Sheriff & Geldart (1995) descreve a expressão que envolve a derivada da velocidade de fase para obter os valores da velocidade de grupo (U) da curva de dispersão (**Equação 2.48**).

$$U = \frac{d\omega}{dk(\omega)} \approx V + f \frac{dV}{df} = V - \lambda \frac{dV}{d\lambda} \quad (2.48)$$

A partir dos dados obtidos na curva de dispersão, procede-se a inversão. Esse processo é descrito por Lines e Treitel (1984) como a estimativa de parâmetros de um modelo postulado por meio de um conjunto de observações, sendo o passo final para gerar a distribuição da velocidade das ondas S com a profundidade. Logo, o modelo será o conjunto de relações que descrevem o fenômeno observado e os parâmetros são os valores que permitem a descrição quantitativa do meio estudado.

Segundo Strobbia (2003) o método de inversão para as ondas superficiais é descrito como sendo não-linear. Assim, Menke (1989) descreve que o sistema deve ser parametrizado como um conjunto finito de parâmetros desconhecidos M (2.49) estimados a partir de N medidas, pelo número de camadas L , sendo a última camada tida como infinita. Assim, os parâmetros desconhecidos são as propriedades geométricas e mecânicas das camadas em subsuperfície, ou seja, em uma camada i , teremos uma velocidade da onda S, um coeficiente de Poisson, uma densidade e uma espessura respectivamente iguais a V_{si} , σ_i , ρ_i , h_i .

$$M = [Vs1, \sigma1, \rho1, h1; Vs2, \sigma2, \rho2, h2; \dots; Vsl, \sigma l, \rho l, hl] \quad (2.49)$$

A velocidade de propagação das ondas Rayleigh d para um número N de valores discretos de frequência será descrito como na **Equação 2.50**, e para cada frequência haverá uma função que resultará em um valor de velocidade da onda Rayleigh (**Equação 2.51**).

$$d = Vr1, Vr2, Vr3, \dots, VrN \quad (\text{Equação 2.50})$$

$$\begin{array}{l} Vr1 = G1(Vs1, \sigma1, \rho1, h1; Vs2, \sigma2, \rho2, h2; \dots; Vsl, \sigma l, \rho l, hl) \\ Vr2 = G2(Vs1, \sigma1, \rho1, h1; Vs2, \sigma2, \rho2, h2; \dots; Vsl, \sigma l, \rho l, hl) \\ (...) \\ VrN = GN(Vs1, \sigma1, \rho1, h1; Vs2, \sigma2, \rho2, h2; \dots; Vsl, \sigma l, \rho l, hl) \end{array} \quad (\text{Equação 2.51})$$

Onde G é uma matriz de Kernel contendo os coeficientes de relações lineares entre d e M .

Stokoe (1994) descreve que a inversão do MASW é baseada na tentativa e erro, iniciando com uma curva de dispersão teórica que é repetidamente comparada com a curva experimental, gerada a partir de dados de campo, até que se atinja um bom ajuste entre elas. Extraem-se, então, os parâmetros desconhecidos a partir da curva ajustada.

Deve ser ressaltado, que a densidade e o coeficiente de Poisson são parâmetros supostos, ou seja, baseiam-se em informações relacionadas à influência desses parâmetros na curva de dispersão.

O uso das técnicas de onda superficiais como o SASW e MASW tem sido aperfeiçoada e difundida nas últimas décadas. Strobbia (2003) descreve que muitos trabalhos, em diferentes lugares, têm confirmado os bons resultados desse método em relação a outras técnicas sísmicas para o estudo da geologia rasa, embasadas em um conjunto expressivo de dados experimentais. Destacam-se, por exemplo, os trabalhos de Stokoe (1994), Malovichko *et al.* (2002), Lopes (2005), Apaza e Barros (2010) e Gandolfo (2014).

3. METODOLOGIA

Considera-se que a pesquisa aqui proposta é enquadrada como bibliográfica e experimental. Bibliográfica por ter sido concebida com base em material já publicado como livros, artigos, manuais, dissertações e teses. Experimental por ter sido elaborada pela determinação de um objeto de estudo (solos), pela seleção das variáveis e formas de estudar o objeto (ensaios sísmicos) e pela observação e descrição dos efeitos que a experimentação produz no objeto (caracterização geológico-geotécnica).

3.1. PESQUISA EXPERIMENTAL

A execução da pesquisa experimental foi realizada pela aplicação de dois métodos de aquisição sísmica, a Refração Sísmica e o MASW. O levantamento geofísico na SQS 215 foi realizado em 13 de novembro de 2015 e na SQS 115 em 12 novembro de 2015. Ambos os métodos são divididos em 3 fases principais: aquisição de campo, processamento dos sismogramas e processo de inversão. A diferença entre os métodos é que o primeiro processa os dados das ondas P e o segundo os dados das ondas R, utilizando a seleção de traços distintos no sismograma. O modelo de inversão dos dados também é distinto.

Os equipamentos utilizados para aquisição de dados sísmicos na pesquisa foram disponibilizados pelo Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB). Eles são listados a seguir e expostos na **Figura 3.1**:

- Sismógrafos Geode de 24 canais da marca Geometrics (2 unidades);
- Geofones de 14 Hz da marca Geospace (48 unidades);
- Laptop com o módulo de controle e aquisição do software SeisImager (1 unidade);
- Cabos conectores dos geofones com 120 metros de extensão e 12 conectores com duas saídas fêmeas (2 unidades);
- Cabos conectores dos geofones com 120 metros de extensão e 12 conectores com uma saída macho e outra fêmea (2 unidades);
- Cabos conectores entre sismógrafos e o laptop (2 unidades);
- Baterias de 12 volts (4 unidades);
- Trenas (2 unidades).

Como dito anteriormente, a intenção da pesquisa foi que um único procedimento de campo, fosse suficiente para a aquisição de dados para a análise, processamento e inversão, segundo os dois métodos sísmicos supramencionados. Assim, as linhas sísmicas foram planejadas de forma que tal premissa fosse cumprida.

Para a determinação dos parâmetros de aquisição foi aproveitada a experiência adquirida por Seimetz (2012) durante os testes de calibração do levantamento de dados por ele executado, para composição de sua dissertação de mestrado “Estudos Geofísicos ao Longo do Futuro Trecho Norte do Metro de Brasília”.

EQUIPAMENTOS USADOS NO TRABALHO DE CAMPO

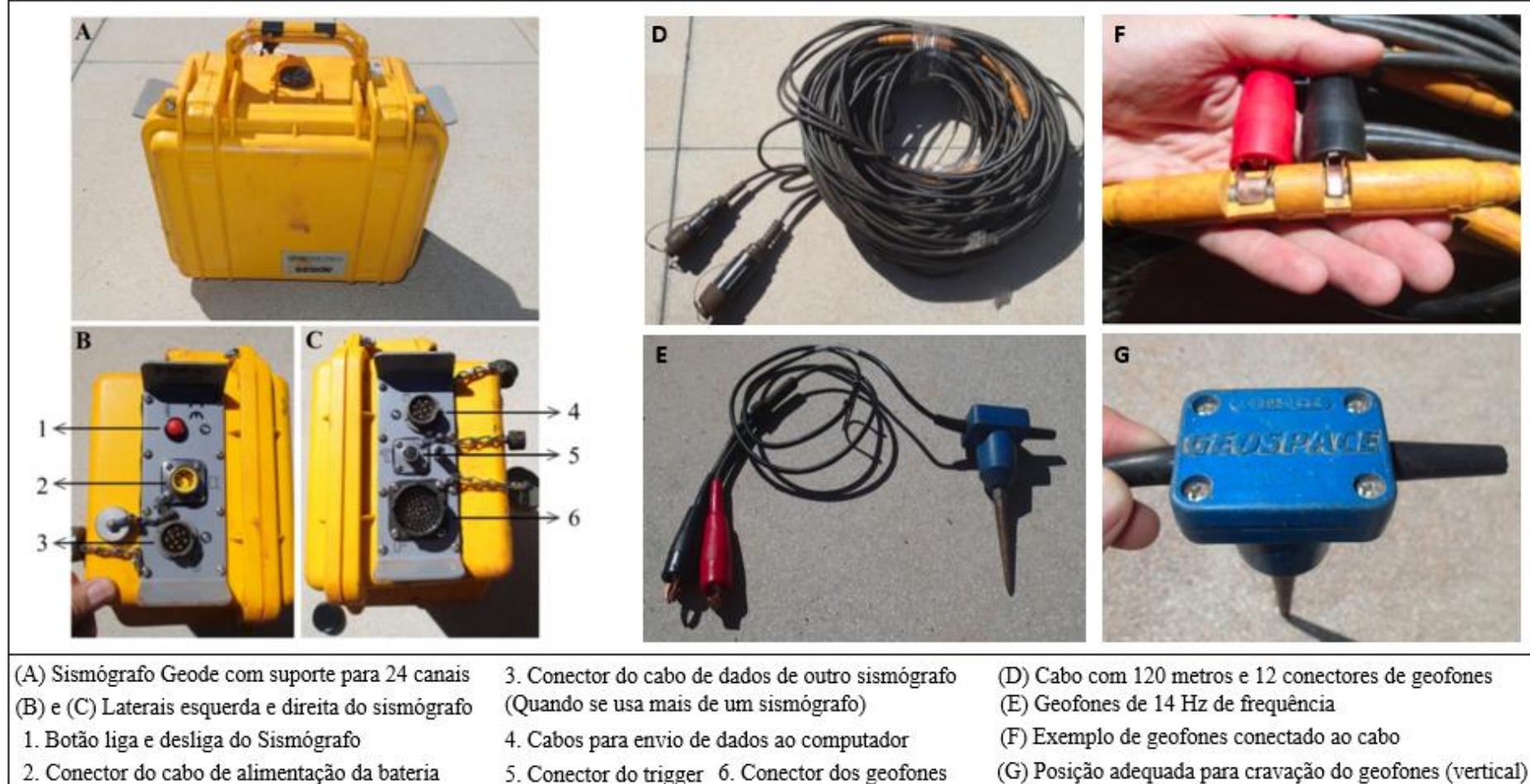


Figura 3. 1: Equipamentos utilizados no trabalho de campo.

Seimetz (2012) considerou que 48 geofones de 14 Hz espaçados 2 metros seria a configuração mais adequada, ou seja, melhor relação entre a profundidade e a amostragem nas curvas tempo-distância.

Quanto à fonte, Seimetz (2012) conclui, a partir dos testes realizados com uma marreta de 8 kg, considerando a configuração das linhas sísmicas por ele propostas (comprimento em torno de 90 metros e as características de sua área de estudo), que o número de golpes por tiro para além de 20 marretadas não produzia melhora na qualidade do sinal sísmico registrado.

Para a avaliação se o arranjo proposto para aquisição da Refração Sísmica serviria também para aquisição dos dados sísmicos pelo método MASW, foi utilizada proposta de Park *et al.* (2002), que publicaram uma relação de parâmetros e limites, com base em estudos empíricos, procurando-se estabelecer as condições ideais para o registro das ondas superficiais (**Tabela 3.1**). Além disso, foram também utilizados como referências, os trabalhos de Strobbia (2003), Lopes (2005) e Ardito (2013).

Tabela 3. 1: Tabela de parâmetros recomendados para aquisição ativa (Park *et al.*, 2002),

Valores Recomendados											
Prof. Zmax (m)	Fonte (S) (kg)	Recep. (R) (Hz)	Comprimento do Arranjo (m)				Parâmetros de Registro				
			Comprim. (D)	Offset da Fonte (Xi)	Espaçamento Receptores (dx)		dt (ms)	T (s)	Empilhamento Vertical		
					24 canais	48 canais			Calmo	Ruid.	Mto Ruid.
< 1	< 0,5	4,5-100	1-3	0,2-0,3	0,05-0,1	0,02-0,05	0,5-1,0	0,5-1,0	1-3	3-5	5-10
1-5	0,5-2,2	4,5-40	1-15	0,2-15	0,05-0,6	0,02-0,3	0,5-1,0	0,5-1,0	1-3	3-5	5-10
5-10	2,2-4,5	< 10	5-30	1-30	0,2-1,2	0,1-0,6	0,5-1,0	0,5-1,0	1-3	3-5	5-10
10-20	> 4,5	< 10	10-60	2-50	0,4-2,5	0,2-1,2	0,5-1,0	1,0-2,0	1-3	3-5	5-10
20-30	> 4,5	< 4,5	20-90	4-90	0,8-3,8	0,4-1,9	0,5-1,0	1,0-2,0	1-3	3-5	5-10
30-50	> 4,5 ou passiva	< 4,5	30-150	6-150	1,2-6	0,6-3,0	0,5-1,0	1,0-3,0	1-3	3-5	5-10
> 50	> 4,5 ou passiva	< 4,5	> 50	> 10	> 2	> 1	0,5-1,0	> 1,0	1-3	3-5	5-10

Em relação a frequência de corte dos geofones, ressalta-se que a presente pesquisa foi limitada pela infraestrutura disponível no IG/UnB, na qual o geofone de menor frequência era o de 14 Hz. Park *et al.* (2002), indica que o ideal seria o uso de geofones menores ou igual a 10 Hz, visto que quanto menor fosse a frequência de corte, maior seria a chance do comprimento de onda medido fosse maior e, dessa forma, maiores profundidades poderiam ser alcançadas. Entretanto, Ardito (2013) informa que, em geral, as ondas geradas por fontes ativas apresentam comprimento entre 1 e 30 metros e frequências que variam entre 15 e 50 Hz. Assim, pelo tipo de fonte utilizada, acredita-se que os geofones de 14 Hz atenderiam bem ao levantamento pelo método MASW.

O espaçamento entre os geofones usados na linha de Seimetz (2012) proporcionou o alcance, ao menos teoricamente, de uma profundidade entre 12 e 18 metros de profundidade, visto que em geral as profundidades alcançadas nesse método são entre 5 e 7 vezes menores que o comprimento da linha de geofones. Park *et al.* (2002) limita o espaçamento máximo entre geofones a um máximo de 1,9 metros. Assim, optou-se por estabelecer que o espaçamento entre os geofones seria igual a 1,5 metros. Dessa forma, o comprimento da linha ficaria limitada em 70,5 metros, o que permitiria o alcance de profundidades entre 10 e 15 metros, pela relação comprimento da linha versus profundidade.

Seria diminuída, então, a profundidade alcançada no método de refração sísmica e em contrapartida, diminuir-se-ia a profundidade mínima (Z_{min}) de investigação do ensaio MASW, já que espaçamento entre os geofones ou dx nesse método, determina o Z_{min} . Assim, sendo dx igual a 1,5 metros, pelo desenvolvimento da **Equação 3.1**, ter-se-ia uma profundidade mínima entre 0,45 e 1,5 metros.

$$Z_{min} = k \cdot dx \quad (0,3 \leq k \leq 1,0) \quad (3.1)$$

Desta forma, as linhas sísmicas adotadas na presente pesquisa apresentaram os seguintes parâmetros de aquisição:

- Comprimento da linha = 70,5 metros;
- Espaçamento entre os geofones = 1,5 metros;
- Geofones de 14 Hz;
- Fonte de 8 kg;
- 20 marretadas por tiro.

Segundo apresentado por Ardito (2013), a profundidade máxima tem relação com a distância entre o primeiro e o último geofones, denominando de comprimento do arranjo. Assim, pelo desenvolvimento da **Equação 3.2**, a profundidade máxima (Z_{max}) alcançada pelo levantamento a partir do método MASW estaria entre 23,50 e 70,50 metros, visto que o comprimento do arranjo foi igual a 70,50 metros.

$$D = m \cdot Z_{max} \quad (1 \leq m \leq 3) \quad (3.1)$$

Em relação à fonte utilizada, na aquisição foi usada uma fonte ativa com aproximadamente 8 kg, tal parâmetro está acima do mínimo considerado para aquisição de dados em profundidades de até 50 metros

Os arranjos da fonte em relação aos receptores para cada tiro, quando considerado o ensaio de refração sísmica, estão expostos nas **Figuras 3.2 e 3.3**.

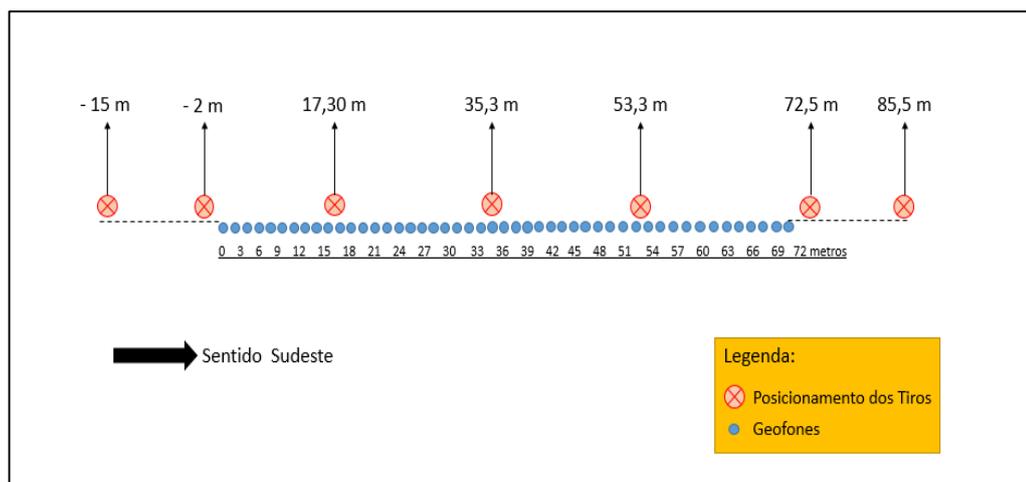


Figura 3. 2: Geometria da linha sísmica da 215 Sul.

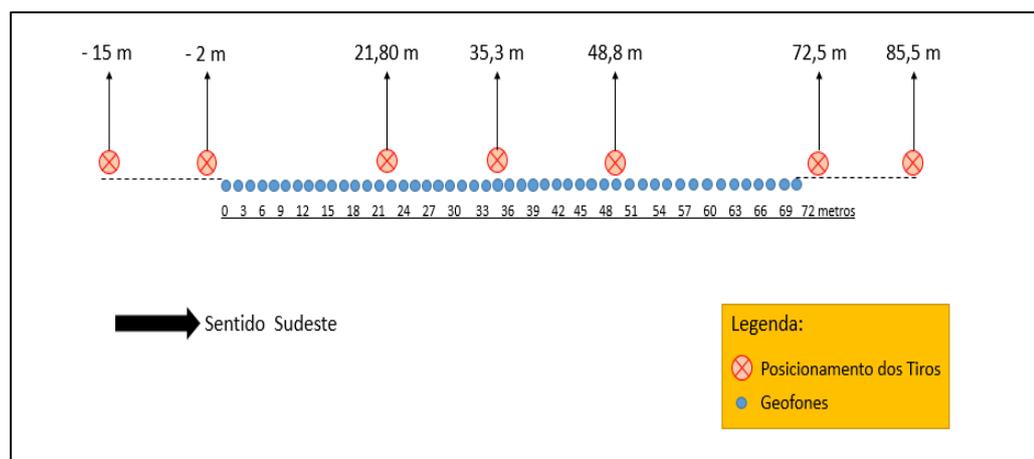


Figura 3. 3: Geometria da linha sísmica da 115 Sul.

No caso da configuração dos tiros para obtenção dos perfis 1D, no método MASW, foi utilizada a configuração padrão ou distribuição linear dos geofones. Como foi mantida constante a configuração do arranjo, em cada um dos perfis, tendo sido alteradas a posição de tiros, considera-se que foram executados em cada aquisição (SQS 215 e 115) 4 perfis 1D.

Antes, porém, deve ser apresentado o Offset (X_i) ou a distância entre a fonte e o primeiro receptor. Park *et al.* (2002), com o objetivo de minimizar o registro de outros tipos de fontes acústicas (ruído) sugere distâncias mínimas de X_i . No caso de linhas com comprimento entre 10 e 150 metros, o Offset X_i recomendado deverá ser maior ou igual a

2 metros. No caso, o levantamento efetuado nessa pesquisa o Offset Xi foi estabelecido como igual a 2 metros.

Então, para cada linha foi possível construir 4 perfis na SQS 215 e 115. As configurações de aquisição pelo método MASW na SQN 215 foram consideradas conforme descrito a seguir:

- Perfil 01/215 - tiro na extremidade da seção (fonte = - 2 metros), o perfil 1D ficou posicionado no meio da seção (35 metros) e a profundidade esperada ficou entre 23,5 e 70,5 metros;
- Perfil 02/215 - tiro na posição 17,30 da seção, o perfil 1D ficou posicionado a 46 metros do início da seção, já que foi considerada que a linha nesse caso estivesse iniciando a 19,30 metros do início da seção, logo, a profundidade esperada ficou entre 17,6 e 51,2 metros;
- Perfil 3/215 - tiro na posição central, considera-se que ocorreu propagação em ambos os sentidos de forma similar, visto que é de conhecimento que o solo local apresenta camada plano-paralelas e continuidade lateral. Assim o perfil 1D produzido foi posicionado tanto de um lado (15,2 metros) quanto do outro (54,8 metros), sendo a profundidade prevista entre 10 e 30 metros;
- Perfil 4/215 - tiro a 53,30 metros do início da seção, o perfil 1D ficou posicionado a 24,6 metros do início da seção, já que foi considerada que a linha nesse caso estivesse iniciando a 51,30 metros do início da seção e a propagação de interesse fosse no sentido contrário ao da linha sísmica. Neste caso a profundidade esperada ficou entre 17,1 e 51,3 metros.

A **Figura 3.4** ilustra na forma de um desenho esquemático as posições de cada perfil da seção da 215 Sul em relação à fonte.

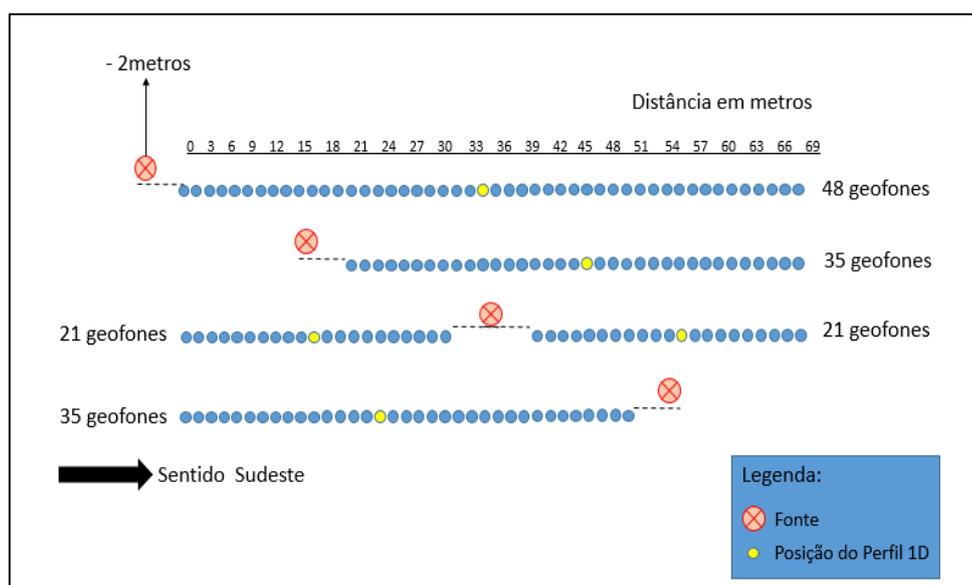


Figura 3. 4: Procedimento considerado para definição da posição dos perfis 1D produzidos com os sismogramas gerados na 215.

Seguindo os mesmos critérios, as posições dos perfis 1D na seção da 115 Sul estão descritas conforme apresentado a seguir:

- Perfil 1/115 - tiro na extremidade da seção (fonte = - 2 metros), o perfil 1D ficou no meio da seção (35 metros) e a profundidade esperada ficou entre 23,5 e 70,5 metros;
- Perfil 2/115 - tiro a 21,8 metros do início da seção, infere-se que o perfil 1D ficou a 49 metros do início da seção, já que foi considerada que o início da linha nesse caso seria como tivesse começado a 23,8 metros, logo, a profundidade esperada ficou entre 15,6 e 46,7 metros;
- Perfil 3/115 - tiro na posição central, considera-se que ocorreu propagação nas duas direções de forma similar, podendo situar o perfil tanto de um lado (15,2 metros) quanto do outro (54,8 metros) da seção, sendo a profundidade prevista entre 10 e 30 metros;
- Perfil 4/115 - tiro na posição 48,8 da seção, o perfil 1D ficou a 23,7 metros do início da seção. Neste caso a profundidade esperada ficou entre 15,6 e 46,8 metros.

A **Figura 3.5** ilustra na forma de um desenho esquemático as posições de cada perfil da seção da 115 Sul em relação à fonte.

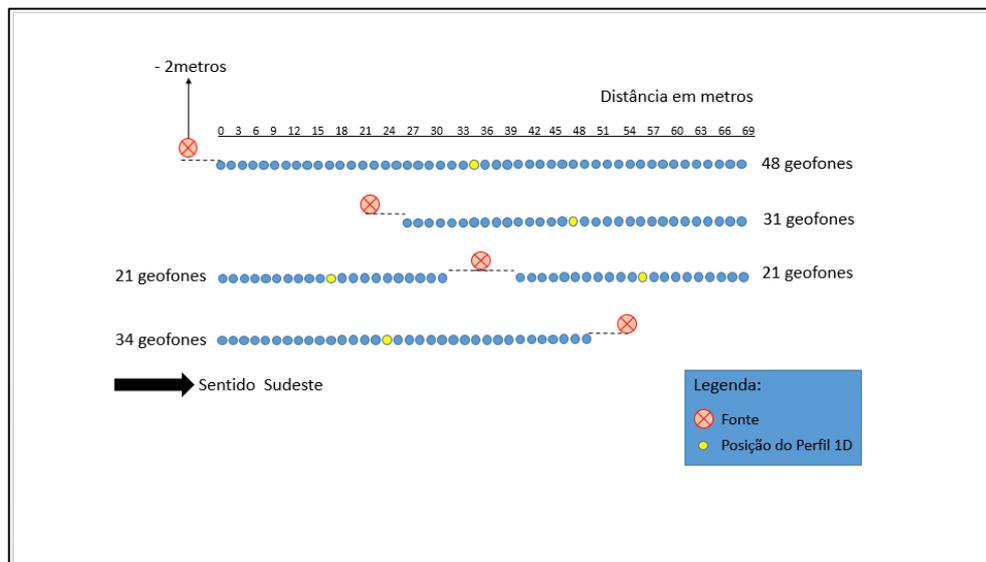


Figura 3. 5: Procedimento considerado para definição da posição dos perfis 1D produzidos com os sismogramas gerados na 115.

3.1.1. PROCESSAMENTO E INVERSÃO DA SÍSMICA DE REFRAÇÃO

Os dados foram processados a partir do pacote de programas Seislmager da Oyo Corporations, especificamente o programa Pickwin, versão 4.2.0 e Plotrefa 2D, versão 2.9.1.9.

O programa Pickwin foi usado para marcação das primeiras chegadas (ondas P) diretamente no sismograma. Além disso, pode-se otimizar a aparência dos dados para melhorar a visualização das primeiras chegadas. Para tanto, filtraram-se os dados, selecionou-se o melhor ganho de exibição, alteram-se as escalas de distância e de tempo, mudou-se o estilo de traçado, etc.

O Pickwin, inclusive, escolhe automaticamente as primeiras chegadas com a seleção dos picks (primeiro registro de onda em cada geofone). Estas escolhas devem ser avaliadas visualmente, utilizando-se os procedimentos citados, e alteradas conforme conveniência e experiência do usuário. Na **Figura 3.6** é possível observar um exemplo de sismograma com a marcação das primeiras chegadas.

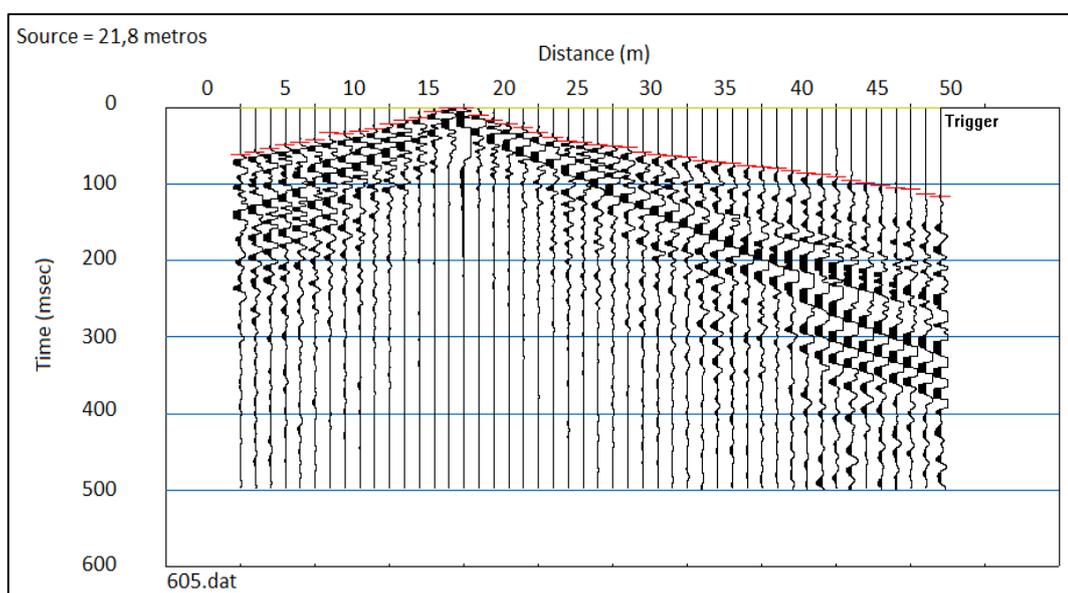


Figura 3. 6: Exemplo de marcação dos picks (em vermelho).

O próximo passo é salvar os picks. Tal procedimento foi efetuado em cada sismograma obtido na aquisição sísmica. Depois salvo, o sismograma com os picks pode ser reeditado. Por exemplo, pode-se eliminar, reamostrar ou alterar as informações de geometria no cabeçalho.

Este é um recurso útil para corrigir todos os erros que possam ter acontecido no procedimento de campo. Por exemplo, usar um comprimento de registro muito maior do que era necessário, resultando em arquivos muito grandes. Este recurso permitirá que se elimine a parte desnecessária do arquivo.

Dando prosseguimento ao processamento, o segundo método de Refração Sísmica, os arquivos processados no Pickwin foram abertos no programa Plotrefa, na forma de um gráfico de curvas tempo versus distância (**Figura 3.7**), para que fosse

possível gerar posteriormente um modelo de duas dimensões contendo a distribuição das velocidades com a profundidade, com base nas primeiras chegadas identificadas.

Assim, seleciona-se as primeiras chegadas de cada camada identificada, insere-se os pontos cotados para correção da topografia do terreno e gera-se o modelo de velocidade versus profundidade (**Figura 3.8**), por meio da rotina de inversão apresentada Fundamentação Teórica.

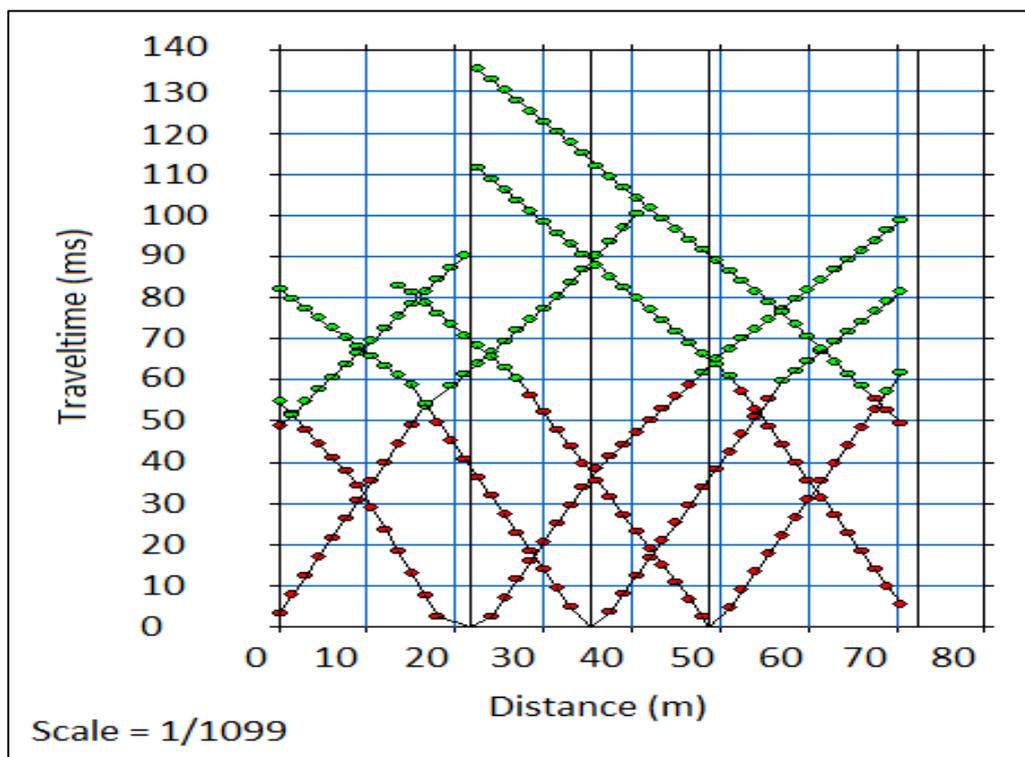


Figura 3. 7: Exemplo de gráfico tempo versus distância com duas camadas identificadas, uma inclinação marcada em vermelho e a outra de verde.

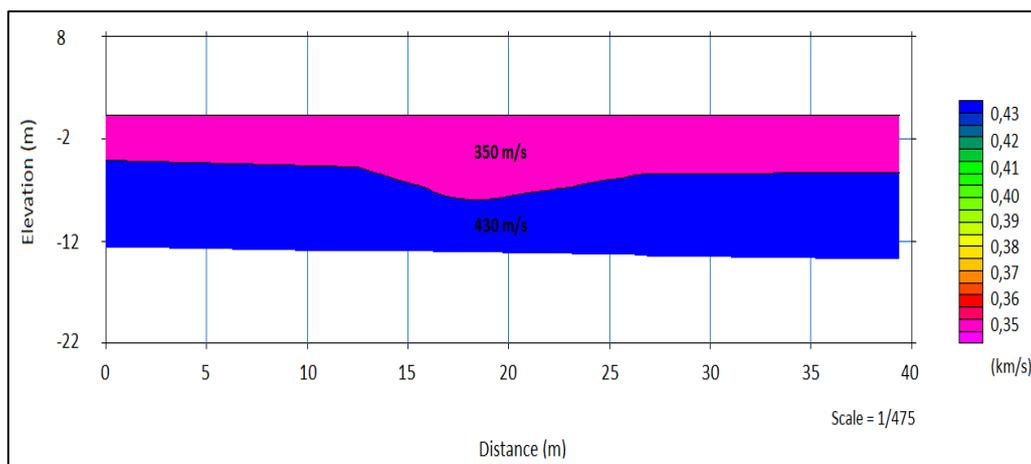


Figura 3. 8: Exemplo de um modelo 2D.

3.1.2. PROCESSAMENTO E INVERSÃO DO MASW

Os dados foram processados a partir do pacote de programas SeisImager da Oyo Corporations, pelo uso do programa Surface Analysis Wizard, versão 4.2.0, módulo de processamento 1D para fontes impulsivas.

O primeiro passo do processamento é gerar as curvas de dispersão pela separação das diferentes frequências contidas no pacote de ondas de superfície e calcular a sua velocidade de fase. Este procedimento é feito por técnicas de filtragem e de análise espectral a partir da aplicação da transformada de Fourier nos dados.

Após determinação da curva de dispersão, essa foi exportada para o programa WaveEQ. Nesse módulo do SeisImager, procede-se ou não a edição dos da curva de dispersão e gera-se um modelo inicial da curva 1D da velocidade S em profundidade.

A análise de inversão só pode ser iniciada após a finalização da análise espectral. Assim, a partir desse ponto, procede-se a inversão, gerando o modelo final 1D, registrando o valor do desvio Quadrado Médio ou Root Mean Square (RMS), devendo ser verificado o erro de ajuste pela inversão dos dados. O manual do software recomenda que o RMS seja menor do que 6%. O resumo do processamento pode ser observado na **Figura 3.9**.

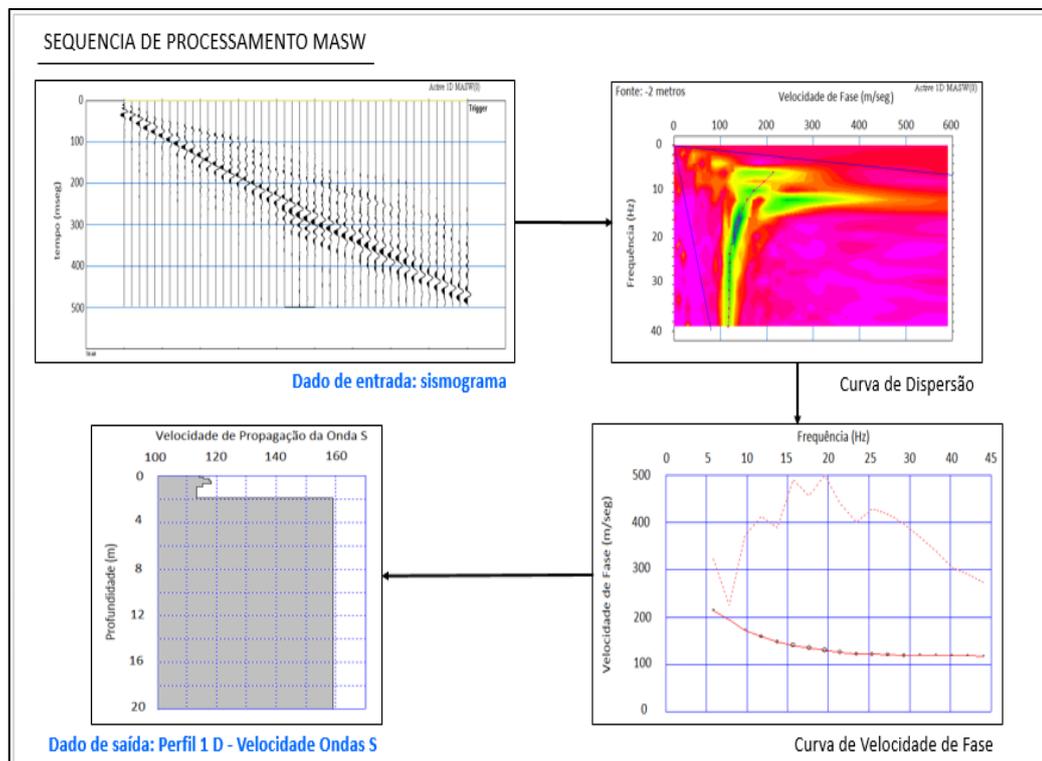


Figura 3.9: Resumo do processamento de dados pelo método MASW.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados desta pesquisa foram organizados na seguinte sequência:

- seções geológico-geotécnicas construídas a partir dos dados de furos de sondagem e ensaios SPT;
- seções geológico-geotécnicas construídas a partir de:
 - perfis de velocidade adquiridos em levantamentos geofísicos pelos métodos de refração sísmica e MASW;
 - parâmetros elásticos calculados a partir dos valores estimados de V_p , V_s , ρ e uso de equações específicas;
- análise comparativa entre os resultados obtidos por meio das sondagens mecânicas e geofísicas.
- seções geológico-geotécnicas construídas a partir da integração de toda a informação geológico-geotécnica disponível e processada nesse trabalho.

4.1. INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA COM DADOS COLETADOS EM SONDAGENS PERCURSIVAS E ENSAIOS SPT

Os dados de sondagem utilizados compõem o conjunto de dados da dissertação de Mestrado de Oliveira (1996). Esses foram compilados de laudos de sondagem das empresas SONDA e INFRASSOLO, e datam de período entre 1973 a 1996. No citado documento, a seleção e organização dos dados geotécnicos foram extraídos desses laudos em função do georeferenciamento das cotas das bocas dos furos e distanciamento mínimo de 20 metros entre furos.

No croqui apresentado (**Figura 4.1**), observa-se a distribuição espacial dos furos analisados e considerados válidos na pesquisa realizada por Oliveira (1996). Desses furos, optou-se pela seleção daqueles que fossem os mais próximos possíveis de áreas verdes, para permitir o levantamento de dados sísmicos pelo método de refração sísmica, e assim viabilizar a comparação dos resultados das sondagens mecânicas com as das sondagens sísmicas. Além disso, o solo sondado deveria ter estratos que pudessem ser devidamente diferenciados pelo levantamento sísmico, ou seja, ter variabilidade estratigráfica na profundidade de alcance do método sísmico aplicado.



Figura 4. 1: Distribuição geográfica dos furos de sondagem analisados no trabalho de Oliveira, 1996.

Para a construção das seções geotécnicas, foram utilizados dois furos de sondagem para o caso da seção da Superquadra Sul (SQS) 215 e três para a seção da SQS 115. As informações utilizadas nesta pesquisa são apresentadas na **Tabela 4.1**.

A primeira informação que foi considerada para interpretação geotécnica, foi a classificação textural do solo. No caso dos furos situados na SQS 215 (**Figura 4.2**), o solo é classificado, nos dois perfis, como argila vermelha nos primeiros metros, passando para argila siltosa e finalizando com silte argiloso (**Figura 4.3**).

No furo IN-004-2 foi identificado um metro de concreção laterítica no final do estrato de argila siltosa, a aproximadamente 17 metros de profundidade. É provável que essa camada tenha origem na variação do nível d'água local. No caso desse furo, o nível d'água foi identificado a 11,5 metros de profundidade, o que corrobora tal correlação.

Também foi identificado o nível d'água no furo IN-003-6, à profundidade de 9,5 metros, fato que demonstra a presença de uma zona de solo saturado entre os dois perfis de sondagem.

Tabela 4. 1: Dados utilizados para avaliação geotécnica do solo, extraído da Dissertação de Oliveira, 1996.

Furo	SD-007-2	SD-007-3	SD-007-4	IN-004-2	IN-003-6
Quadra	115 Sul	115 Sul	115 Sul	215 Sul	215 Sul
Datum	SICAD	SICAD	SICAD	SICAD	SICAD
Zona	23 Sul	23 Sul	23 Sul	23 Sul	23 Sul
Meridiano Central	-45	-45	-45	-45	-45
Coordenada X	186.918	186.897	186.893	187.200	187.265
Coordenada Y	8.247.805	8.247.813	8.247.838	8.247.442	8.247.348
Data	13/03/1973	14/03/1974	13/03/1974	13/03/1973	15/03/1973
Cota (m)	1.069	1.069	1.069	1.049	1.045
Prof. Alcançada (m)	-13,45	-11,45	-13,45	-20,65	-19,45
NA (m)	NE	NE	-12,45	-11,2	-9,5
Espessura 1ª Camada (m)	7	5	5	2	2
Descrição 1ª Camada	Argila siltosa vermelha	Argila siltosa vermelha	Argila siltosa vermelha	Argila vermelha com matéria orgânica	Argila vermelha com matéria orgânica
SPT 1ª Camada	4	4	4	4	4
Espessura 2ª Camada (m)	1	1	1	14	15
Descrição 2ª Camada	Argila siltosa com concreção laterítica	Argila siltosa com concreção laterítica	Argila siltosa com concreção laterítica	Argila siltosa vermelha	Argila siltosa vermelha
SPT 2ª Camada	5-15	5-15	5-15	5 – 15	5 - 15
Espessura 3ª Camada (m)	> 5	>5	> 7	1	> 1
Descrição 3ª Camada	Silte vermelho	Silte argiloso vermelho	Silte vermelho	Argila siltosa com concreção laterítica	Silte argiloso
SPT 3ª Camada	> 15	>15	> 15	5 -15	> 15
Espessura 4ª Camada (m)	-	-	-	>3	-
Descrição 4ª Camada	-	-	-	Silte argiloso rosa	-
SPT 4ª Camada	-	-	-	> 15	-

Já no caso dos furos da SQS 115 (**Figura 4.4**), o solo é classificado, nos primeiros metros, como argila siltosa vermelha, passando por uma camada bem marcada de concreção laterítica, finalizando como silte argiloso vermelho (**Figura 4.5**).

Somente no Furo SD-007-4 foi identificado, em seus últimos metros, o nível d'água. Como dito antes, a presença de concreção em vários furos indica presença de nível d'água variando sazonalmente no solo. Assim, infere-se que durante a realização dos outros furos, o

nível freático estava mais profundo, os níveis não sendo identificado nas sondagens. Deve, contudo, ser relatado, que período do ano em que foram realizados dos furos se esperaria que o nível estivesse mais superficial.

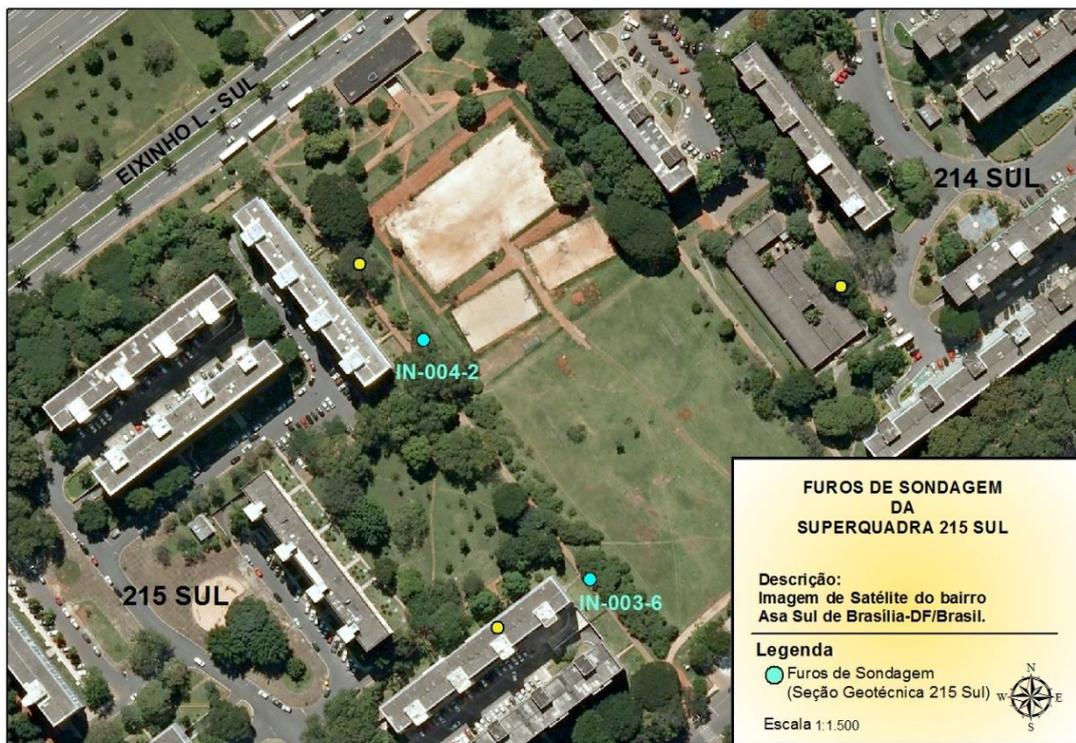


Figura 4. 2: Croqui com localização dos furos de sondagem utilizados para construção da seção geológico-geotécnica da 215 Sul.

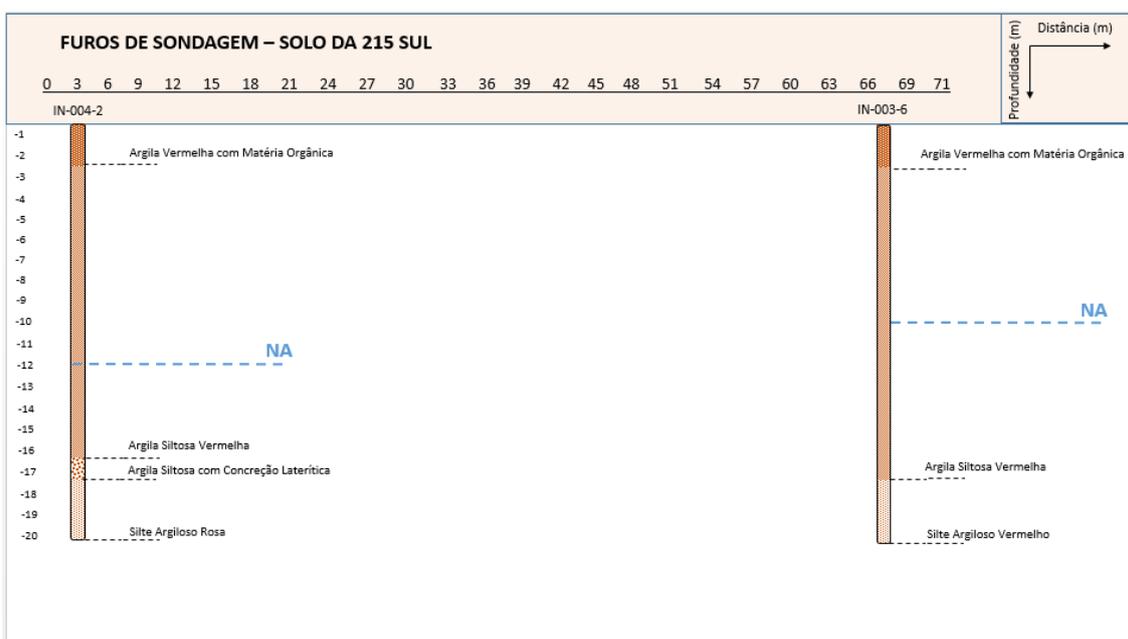


Figura 4. 3: Desenho esquemático com a descrição dos furos de sondagem IN-004-2 e IN-003-6.

Foram, então, construídas duas seções geotécnicas com base na variação textural do solo, uma na SQS 215 (Figura 4.6) e outra na SQS 115 (Figura 4.7).



Figura 4. 4: Croqui com localização dos furos de sondagem utilizados para construção da seção geológico-geotécnica da 115 Sul.

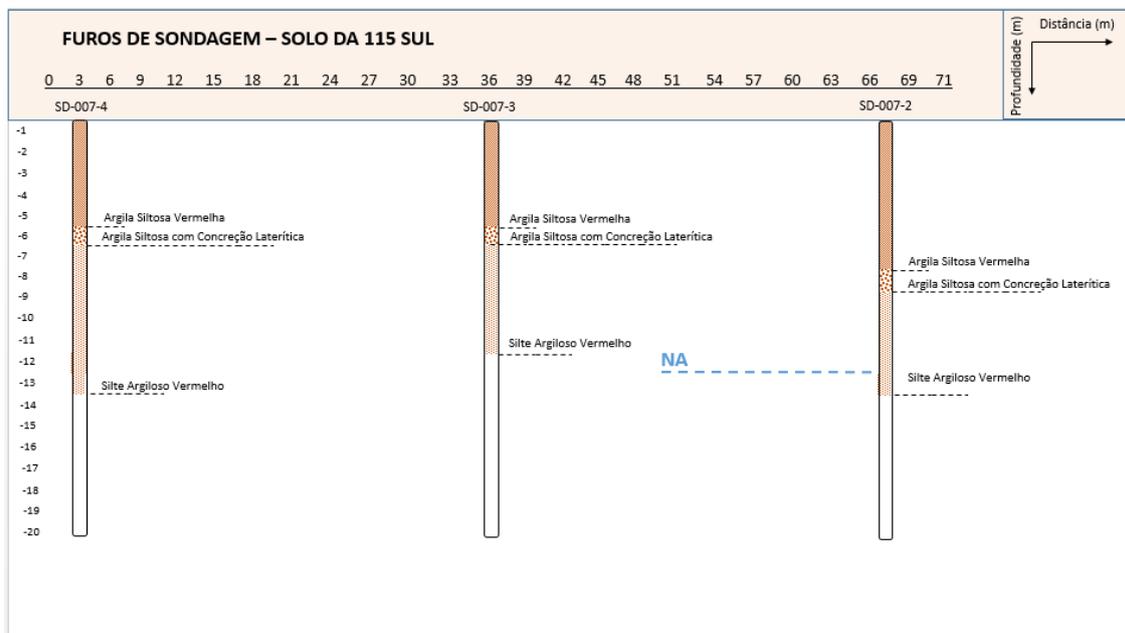


Figura 4. 5: Desenho esquemático com a descrição dos furos de sondagem SD-007-4, SD-007-3 e SD-007-2.

Em cada um dos furos de sondagem foram realizados ensaios SPT, metro a metro. Apesar disso, para simplificar a análise da resistência à penetração, Oliveira (1996) optou por estabelecer faixas de resistências por camada. Assim, classificou cada estrato entre 3 faixas: baixa (0-4), média (5-15) e alta (>15).

No caso dos furos da SQS 215, o solo pôde ser classificado desde baixa resistência à alta resistência ao ensaio de penetração SPT. O mesmo ocorreu no caso dos furos da SQS 115.

É comum na engenharia, a utilização de referências e ábacos que correlacionam parâmetros distintos para representar forças, tensões e esforços em valores compatíveis ou correspondentes. Neste trabalho, optou-se por correlacionar os golpes das faixas NSPT propostas por Oliveira (1996) para classificar o solo quanto à consistência, conforme ABNT NBR 7250:1982 (**Tabela 2.9**).

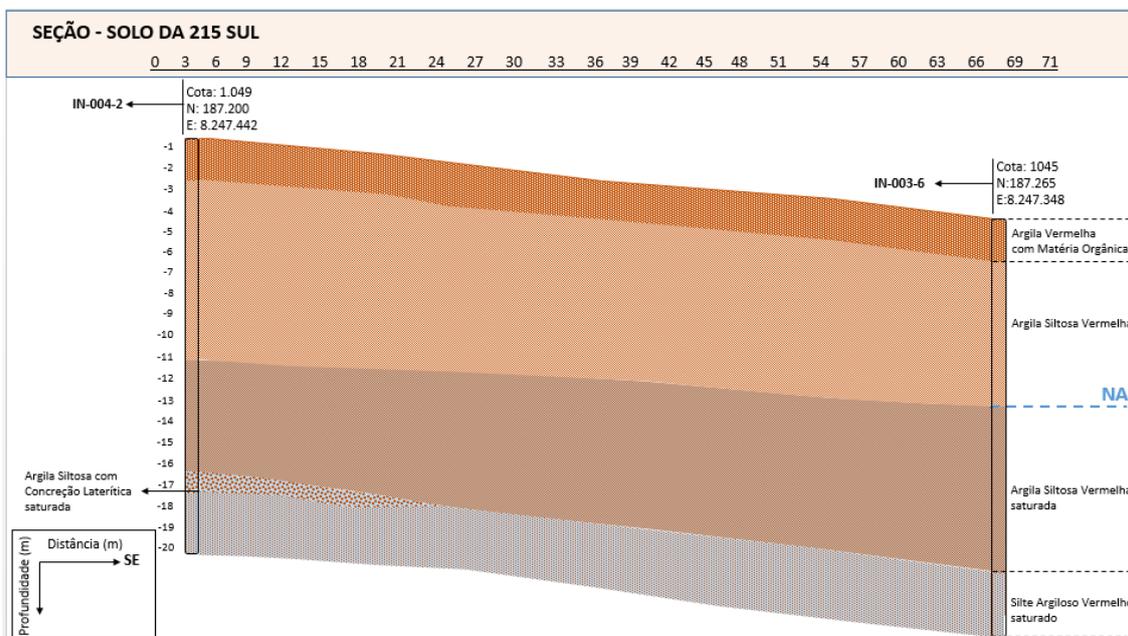


Figura 4. 6: Seção geotécnica da 215 Sul quanto à classificação textural do solo.

Como apresentado no Referencial Teórico, a consistência é empregada essencialmente para classificar solos argilosos ou a fração fina dos solos. Assim, para aplicar de maneira adequada a citada correlação, foi certificado se os solos sondados poderiam ser qualificados como argilosos.

Conforme já apresentado, os solos foram qualificados como sendo: argila siltosa vermelha e silte argiloso vermelho, contendo ou não concreção laterítica. Considerando o uso de Triângulos Texturais, como o de Lemos e Santos (1996) ou o de Rajj (1991), usado pela

EMBRAPA com pequenas modificações, concluímos que os solos sondados são predominantemente argilosos.

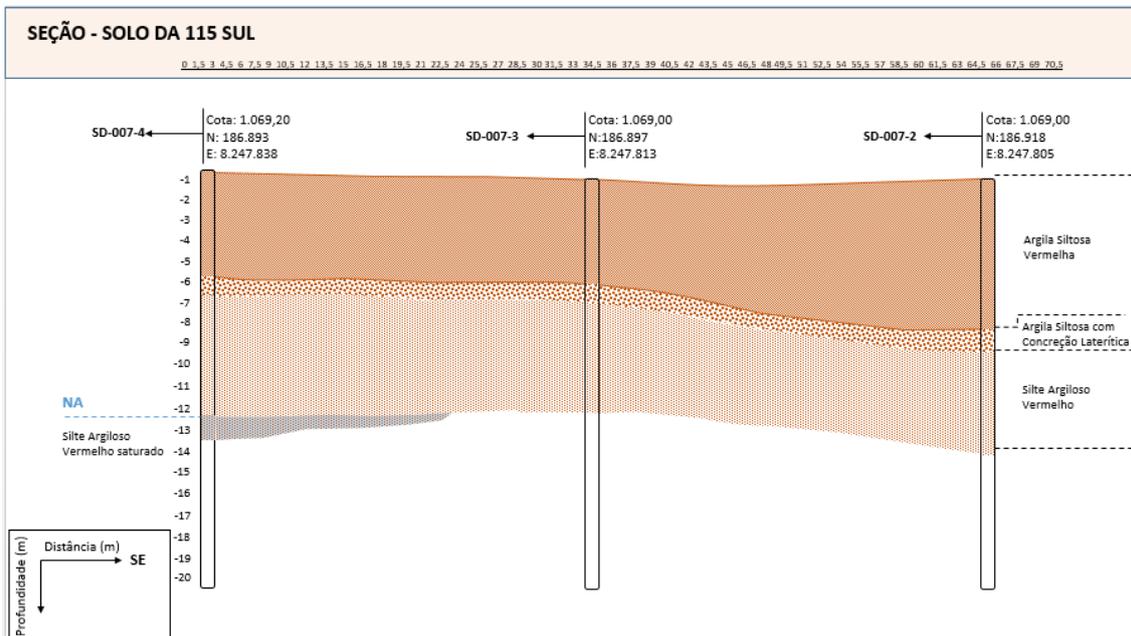


Figura 4. 7: Seção geotécnica da 115 Sul quanto à classificação textural do solo.

Além disso, os furos de sondagem foram executados em áreas sabidamente conhecidas pela presença de espessos latossolos vermelhos e argila porosa (vide capítulo I). Os latossolos são em sua maioria predominantemente argilosos, podendo variar nos teores de silte e areia, com intensa alteração dos silicatos e concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Já a argila porosa constituída por materiais finos, com predominância da fração argila, alta porosidade, sem indício de estrutura reliquiar.

Considerando, então, ser possível classificar os solos da área de estudo pela consistência, o solo da seção geotécnica da SQS 215 foi classificado como de consistência mole nos primeiros 2 primeiros metros de profundidade, de consistência média a rija por mais 14 metros, e a partir de então, de consistência rija a muito rija até as profundidades alcançadas pela perfuração (entre 19 e 20 metros de profundidade).

O solo da seção geotécnica da SQS 115 foi classificado como de consistência mole pelos 6 primeiros metros, de consistência média a rija por 1 metro, e a partir de então, de consistência rija a muito rija até as profundidades alcançadas pela perfuração (aproximadamente 13 metros de profundidade). Nesta seção, infere-se que o aumento na resistência pode estar relacionado ao encontro da camada laterítica.

As seções geotécnicas construídas nas SQS 215 e SQS 115 podem ser observadas nas **Figuras 4.8 e 4.9**, respectivamente.

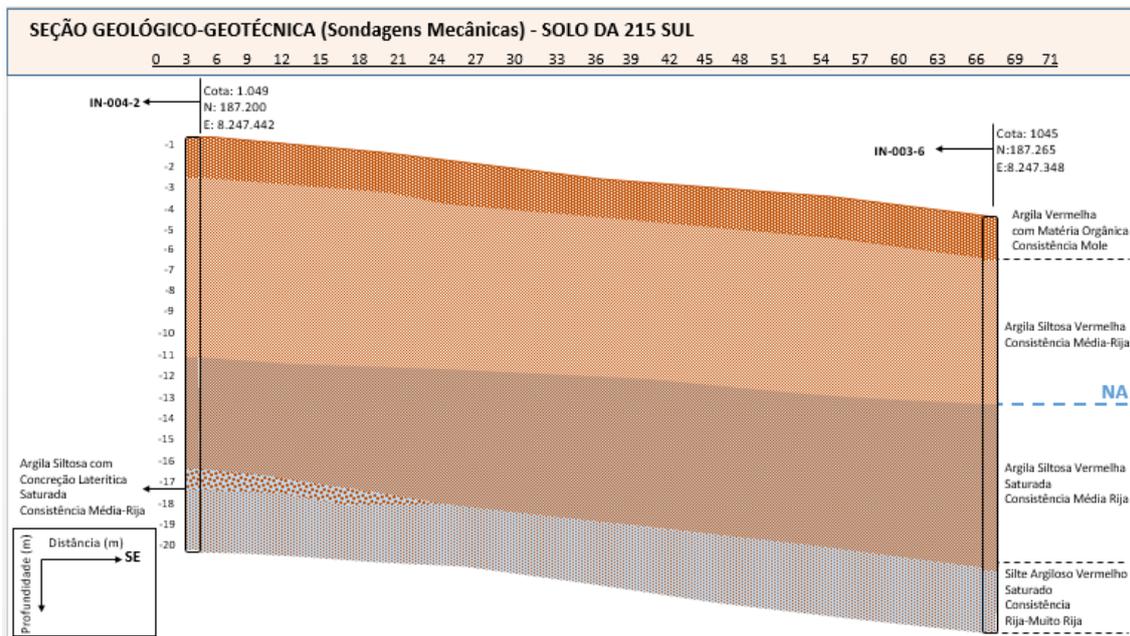


Figura 4. 8: Seção geotécnica da 215 Sul quanto à consistência do solo.

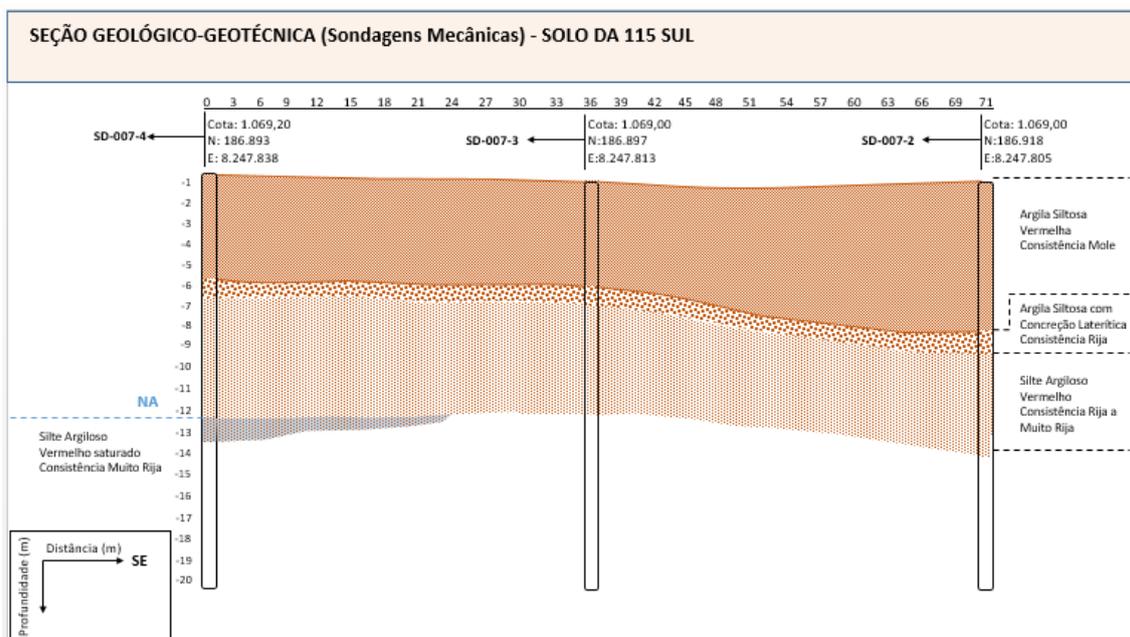


Figura 4. 9: Seção geotécnica da 115 Sul quanto à consistência do solo.

Por fim, deve ser alertado que as faixas de resistência NSPT usadas neste trabalho limitam a avaliação da resistência, visto que a partir do 16º golpe, qualquer aumento de

resistência não foi devidamente computado e, assim, não foi considerado. Além disso, as faixas apresentam valores intermediários àquelas definidas por Pinto (2006), o que dificulta a correlação entre ambas as faixas.

4.2. INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA COM DADOS SÍSMICOS

Como denominado no presente item, a interpretação geológico-geotécnica apresentada nesse item se baseará essencialmente no levantamento de informações de dados sísmicos, aqui divididos em dois tipos quanto ao método: Refração Sísmica e MASW. O primeiro foi utilizado para obtenção das velocidades das ondas P e determinar as interfaces entre as camadas com diferentes de velocidades. O segundo para obtenção das velocidades das ondas S. Este último, ainda, viabilizou a obtenção da densidade das camadas de diferentes velocidades, que é um dos parâmetros desconhecidos estimados pela inversão dos dados pelo MASW, informação também tida como fundamental para a estimação dos módulos elásticos aqui calculados.

As localizações das seções sísmicas podem ser observadas nos croquis apresentados na **Figuras 4.10 e 4.11**. Já os sismogramas gerados durante a aquisição são apresentados nas **Figuras 4.12 e 4.13**.



Figura 4. 10: Croqui com localização da linha sísmica realizada na 215 Sul.

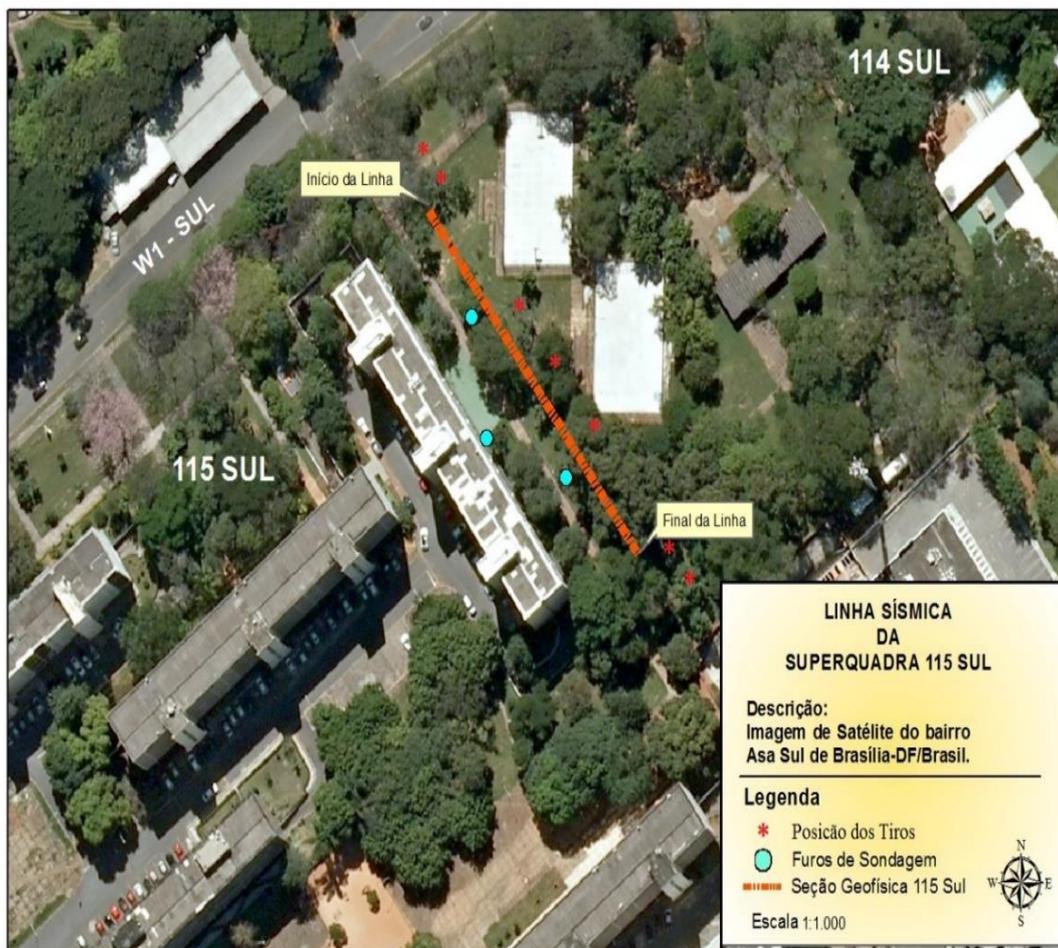


Figura 4. 11: Croqui com localização da linha sísmica realizada na 115 Sul.

Conforme já detalhado no Capítulo III, foi realizada para cada seção apenas uma única linha, de forma que fosse viável o uso do levantamento para processamento de dados nos dois métodos de aquisição sísmica. Assim, foram gerados perfis 2D pelo processamento dos dados pelo método da Refração Sísmica e perfis 1D pelo método MASW.

Ressalta-se que os perfis geofísicos foram realizados o mais próximo possível dos furos de sondagem, assim os furos de sondagem ficaram em média 6 metros de distância do perfil sísmico da SQS 215 e em média 2 metros de distância do perfil sísmico da SQS115.

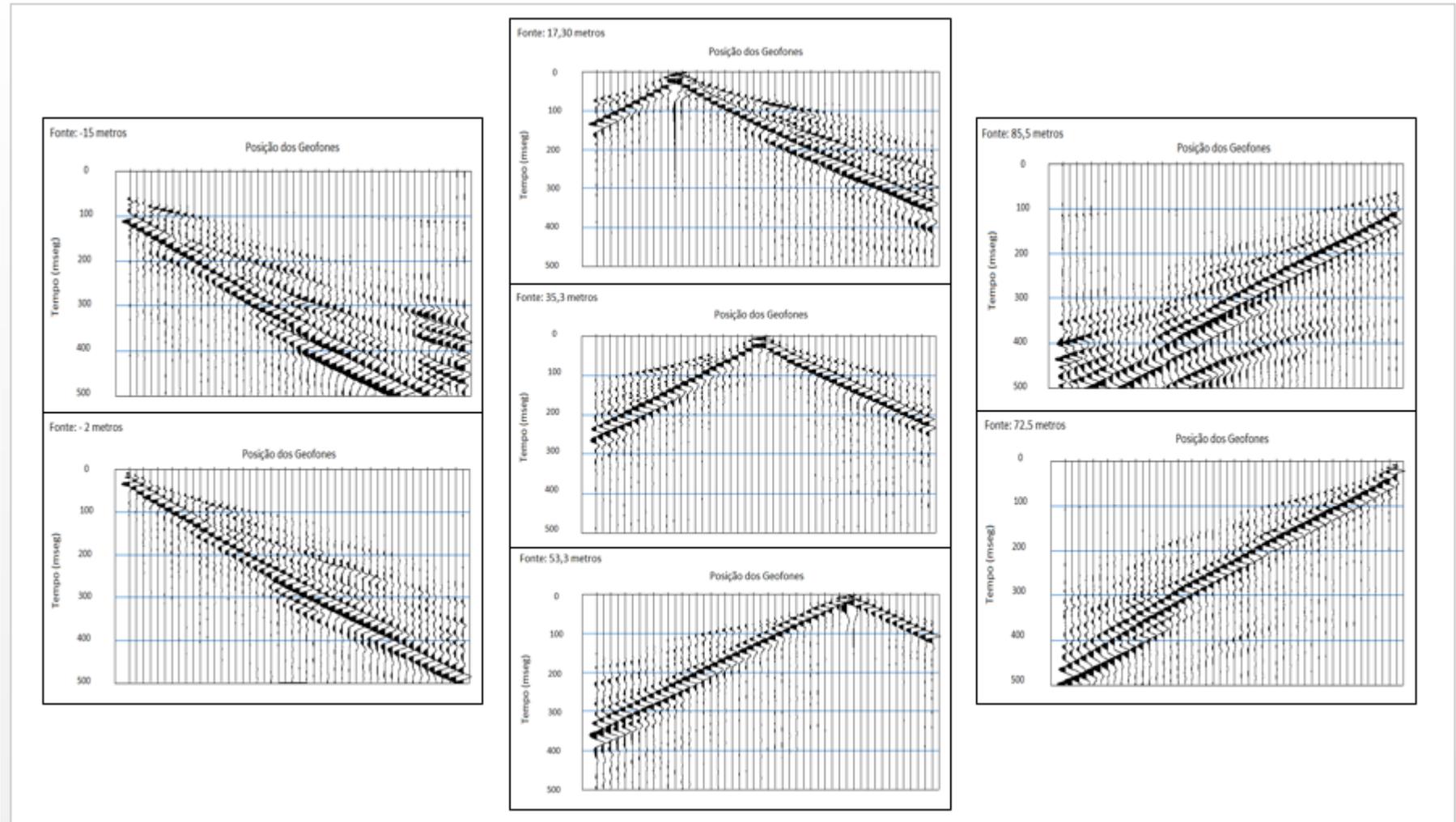


Figura 4. 12: Sismogramas produzidos durante a sondagem geofísica na SQS 215.

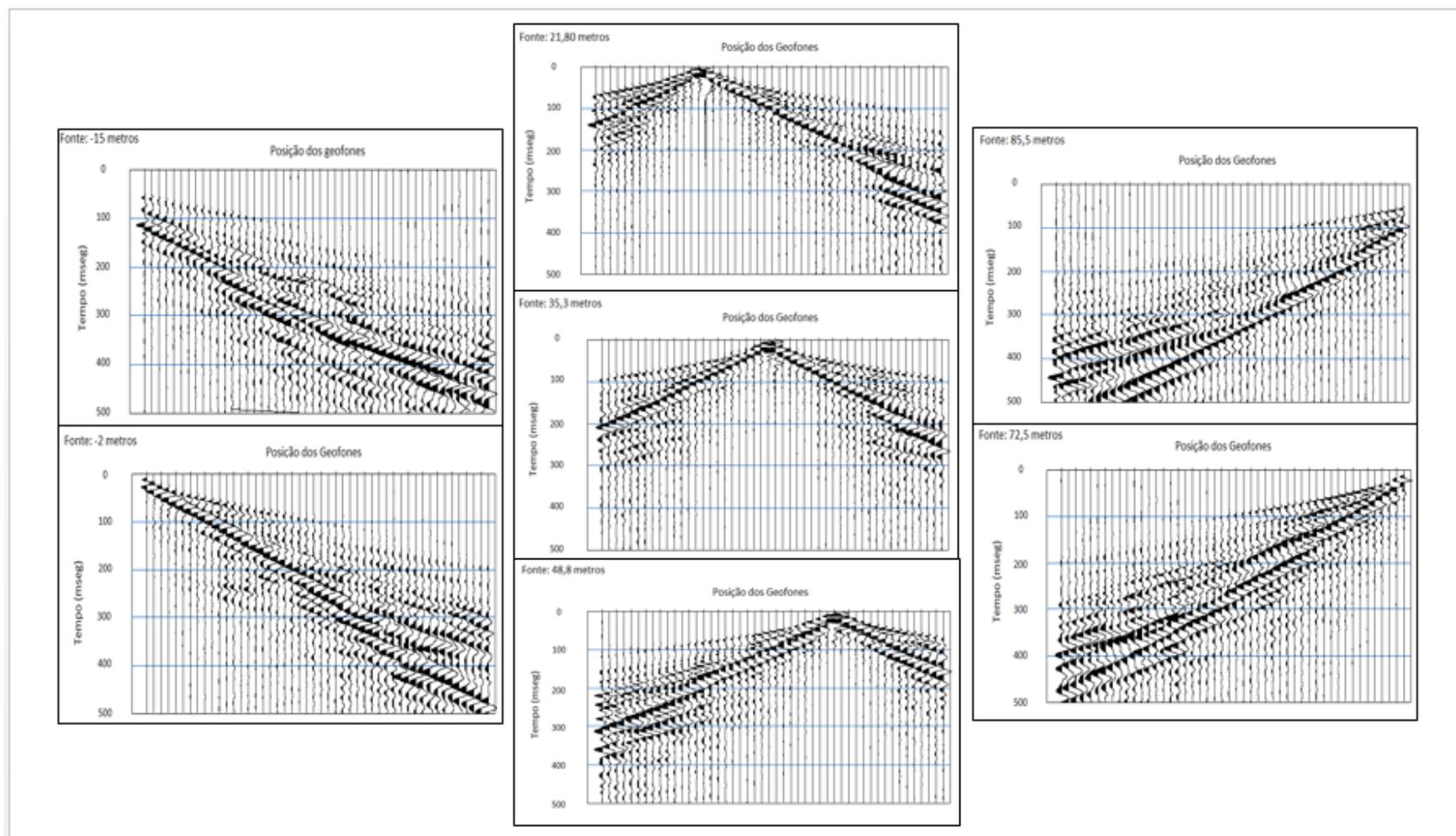


Figura 4. 13: Sismogramas produzidos durante a sondagem geofísica na SQS 115.

4.2.1.RESULTADOS - MÉTODO DE REFRAÇÃO SÍSMICA

Os resultados obtidos com método da refração sísmica se resumem em dois perfis 2D de onda P (primeiras chegadas), que alcançaram as seguintes profundidades: 12,2 metros na SQS 215 e 12,8 metros na SQS 115 (**Figuras 4.14 e 4.15**).

No perfil sísmico da SQS 215 foram obtidas duas camadas com velocidades bem distintas, a primeira com 411 m/s e a outra com valor igual a 1.601 m/s. Pela correlação apresentada por Souza *et al.* (1998), a velocidade da primeira camada é característica de argilas ou areias não consolidadas (**Tabela 4.2**), já a segunda camada poderia indicar a presença de areias saturadas, argilas compactadas ou até mesmo uma rocha bastante alterada.

Macedo, *et al.* (1994), confirma a presença recorrente de nível d'água raso na região sondada, com profundidade média de 10 metros, já Blanco (1995) descreve que em perfil realizado no traçado do metrô de Brasília foram identificadas ardósias e seu saprólito a profundidades entre 5 e 20 metros. Assim, somente pela análise do perfil Vp, não seria possível admitir quais das interpretações seria mais adequada para a 2^o camada, ou mesmo se ambas hipóteses poderiam ser confirmadas. Essa última alternativa seria a mais improvável, visto que se esperaria maior velocidade Vp nesse caso específico.

Quanto à escavação (**Tabela 4.3**), a velocidade da 1^a camada indica que o material poderia ser escavado por meio de equipamentos (carregadeiras e escavadeiras) de pequeno porte, já na segunda, a velocidade alcançada indica que o material deveria ser escarificado e só depois removido, ou seja, já constituiria um material que necessitaria de equipamento de maior porte como tratores do tipo D9 ou com potência a partir de 405 Hp. Portanto, somente pela análise da velocidade das ondas P, poderíamos propor por exemplo uma seção geológico-geotécnica quanto à escavabilidade do terreno.

Já no perfil sísmico da SQS 115 foram obtidas também duas camadas, a mais superficial com velocidade Vp igual a 405 m/s e a segunda com Vp igual a 1532 m/s, ou seja, com velocidades compatíveis com às da seção da SQS 215, logo, a interpretação é similar a anterior.

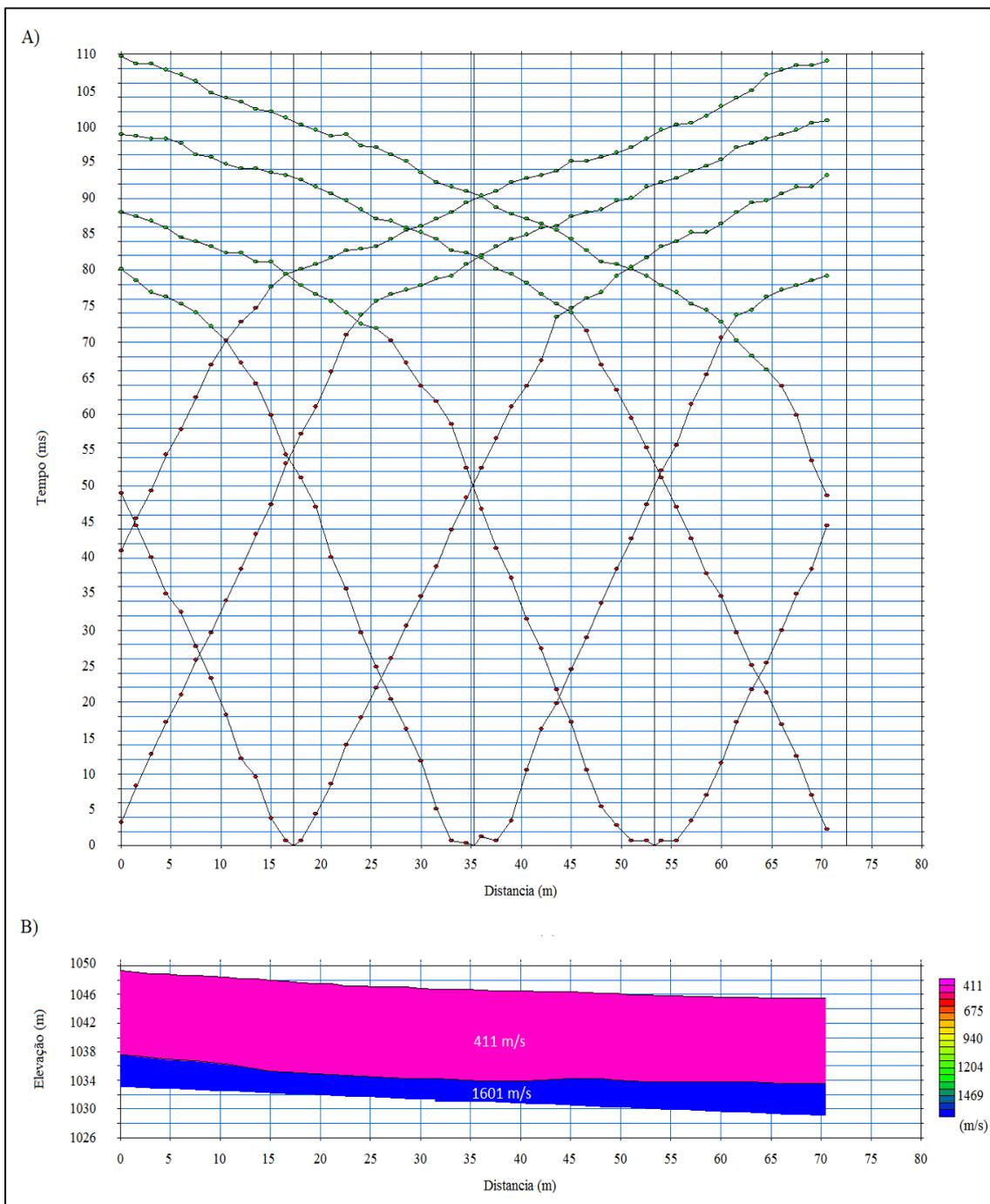


Figura 4. 14: Modelo de velocidades SQS 215: A) gráfico tempo versus distância. B) perfil de velocidade sísmica, onda P.

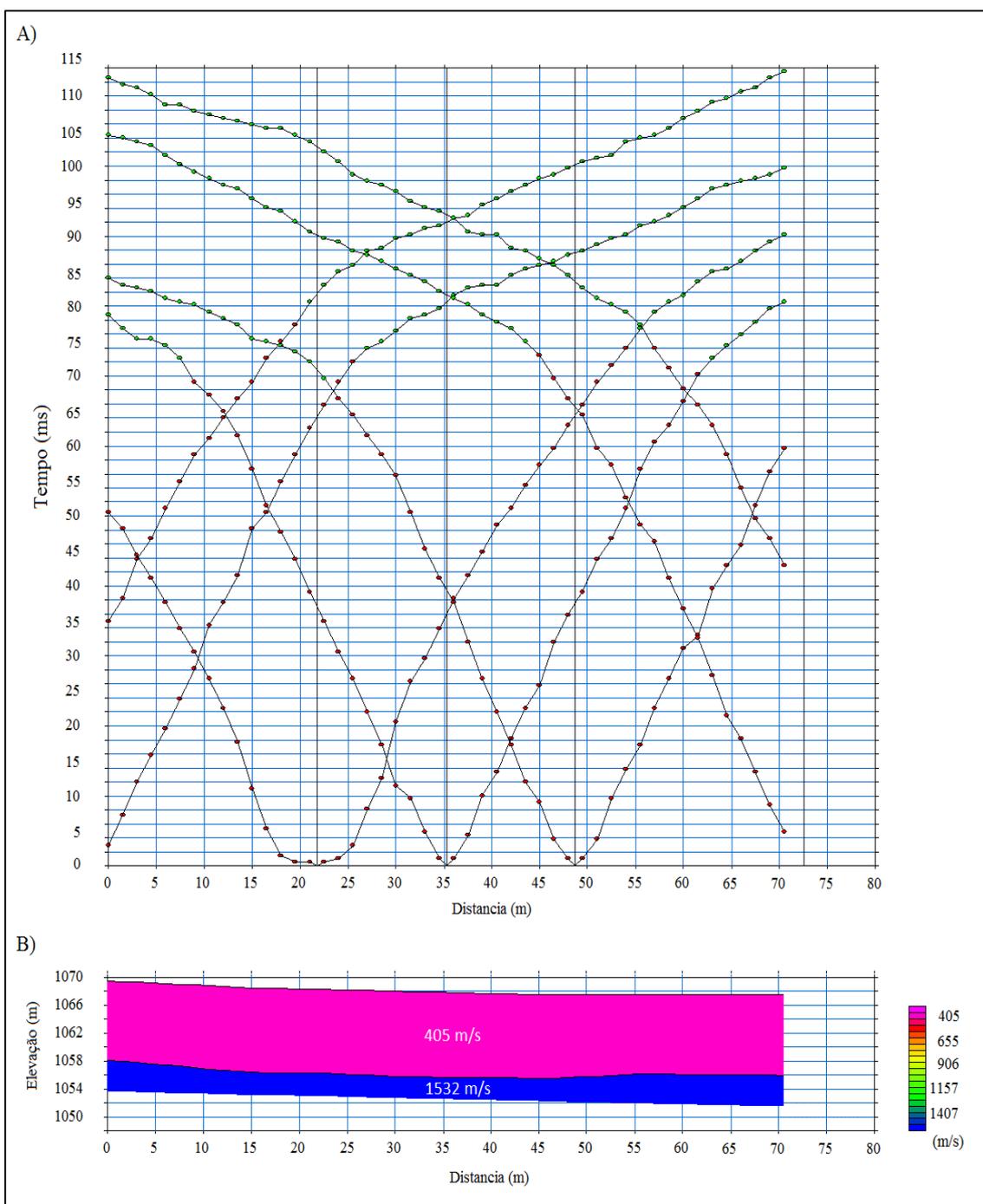


Figura 4. 15: Modelo de velocidades SQS 115: A) gráfico tempo versus distância. B) perfil de velocidade sísmica, onda P.

Tabela 4. 2: Correlação entre a velocidade de propagação de ondas longitudinais (Vp) em diferentes materiais (Souza *et al.*, 1998).

Velocidade Vp (m/s)	Tipo de Materiais
200 – 400	Solos, depósitos superficiais de sedimentos não consolidados.
400 - 1.400	Argilas e Areias não consolidadas.
1.400 - 1.800	Areias saturadas, argilas compactas, rochas bastante alteradas.
1.800 - 2.400	Sedimentos consolidados e provavelmente saturados, rochas metamórficas ou ígneas, rochas altamente fraturadas e ou alteradas, arenito e folhelhos.
2.400 - 3.700	Folhelhos, arenitos, rochas ígneas e metamórficas alteradas e fraturadas.
4.700 - 5.500	Rochas ígneas e metamórficas fracamente alteradas e fraturadas.
5.500 - 6.000	Rochas ígneas e metamórficas sãs e não fraturadas.

Tabela 4. 3: Correlação entre a Vp e escavabilidade do maciço (Redaelli e Cerello, 1998).

Vp (m/s)	Característica do Material	Categoria do Material
300 – 800	Escavável (equipamento normal)	1 ^a
800 - 2.200	Escarificável (trator D9)	1 ^a
2.200 - 2.600	Transição	2 ^a
> 2.600	Escavação por explosivo	3 ^a

4.2.2.RESULTADOS – MASW

Conforme apresentado no Capítulo III (Metodologia), os sismogramas adquiridos na aquisição de campo foram transformados para o domínio da velocidade de fase e frequência e, então, a partir da inversão desses dados, foram gerados os perfis 1D de velocidade da onda S. Para cada linha foram registrados 4 perfis. Entretanto, no perfil nº 3, tanto no da seção da SQS 215 quanto no da SQS 115, não se conseguiu obter intervalos claros para a delimitação de camadas de velocidade, provavelmente pelo tamanho reduzido da linha de geofones. Assim, optou-se pela exclusão desses perfis na análise dos resultados finais. Os demais perfis, utilizados para compor as seções geológico-geotécnicas, são apresentados nas **Figuras 4.16 a 4.21**. Essas contêm também desenhos esquemáticos demonstrando graficamente o ajuste das curvas de velocidades estimadas em cada um dos perfis 1D.

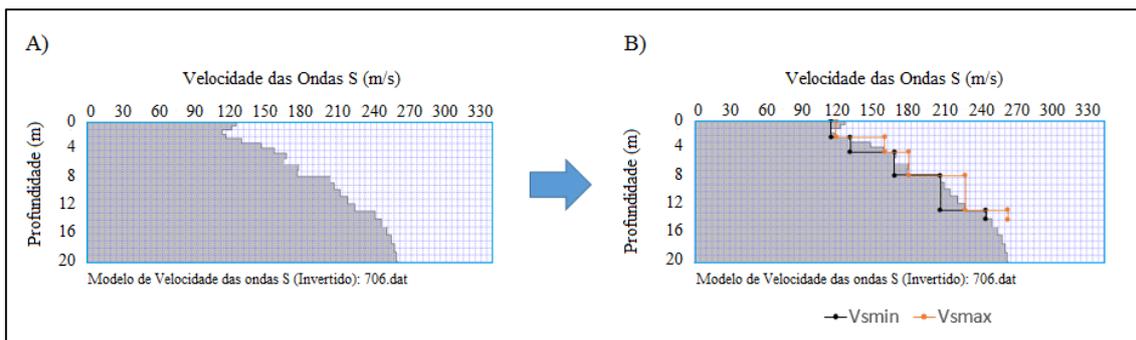


Figura 4. 16: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D n° 1/215. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas no perfil 1D.

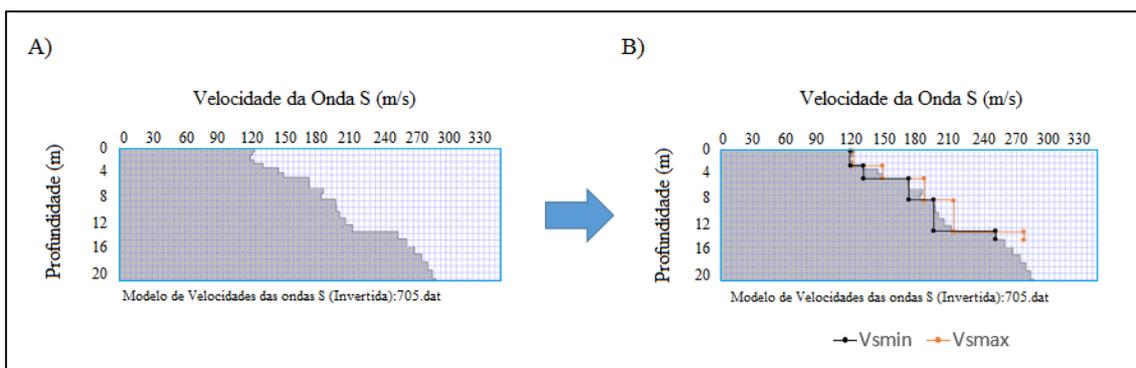


Figura 4. 17: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D n° 2/215. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas no perfil 1D.

Em cada camada identificada no perfil 1D foi, portanto, possível identificar um valor mínimo e máximo de velocidade S. Como a finalidade do levantamento é a produção de seções geológico-geotécnicas, optou-se por utilizar não um valor médio de velocidade, mas sim os valores mínimos e máximos.

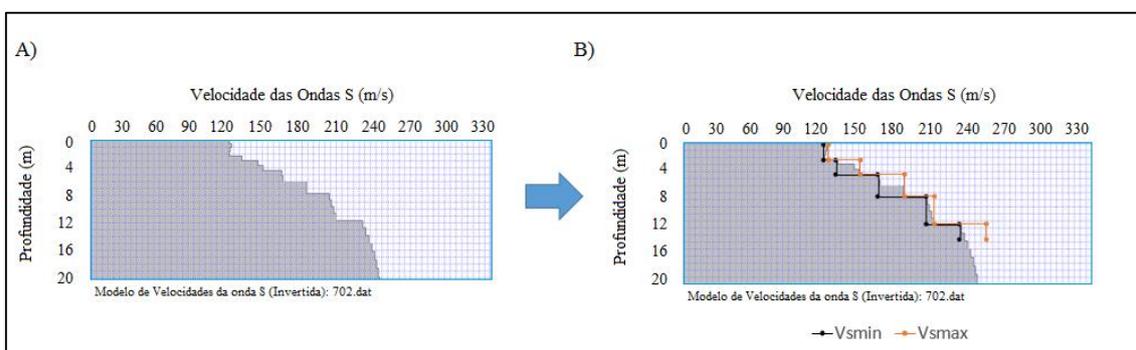


Figura 4. 18: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D n° 4/215. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas e o perfil 1D.

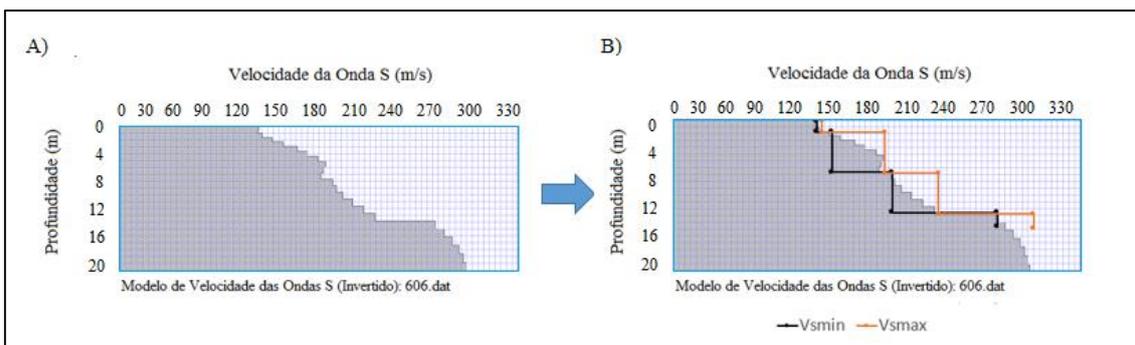


Figura 4. 19: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D nº 1/115. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas e o perfil 1D.

A seguir são apresentados (**Tabela 4.4**) os resultados numéricos obtidos nos perfis 1D obtidos nas seções da SQS 215 e da SQS 115.

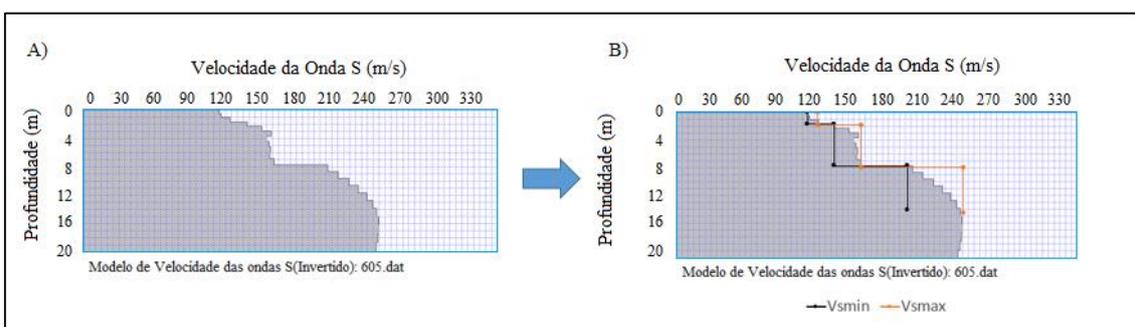


Figura 4. 20: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D nº 2/115. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas e o perfil 1D.

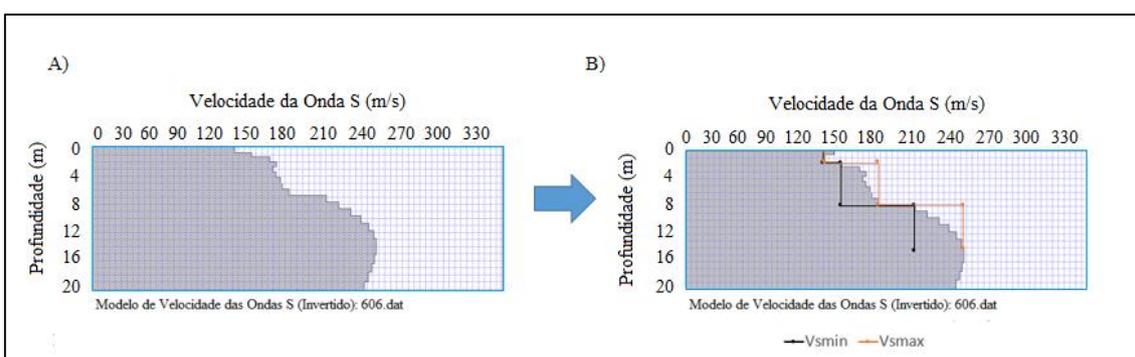


Figura 4. 21: Modelo da velocidade das ondas S: A) perfil 1D nº 4/115. B) ajuste das curvas de velocidades obtidas no perfil 1D.

A distribuição dos perfis ao longo de cada uma das seções, como as apresentadas nas **Figuras 4.22 e 4.23**, a seguir, ajuda a visualizar a distribuição das velocidades mínimas em profundidade, sendo possível inferir a presença de camadas em 2D. O mesmo acontece nas **Figuras 4.24 e 4.25**, nas quais podem ser visualizadas a distribuição das velocidades máximas.

Tabela 4. 4: Resumo dos resultados numéricos obtidos pela execução do MASW.

Perfil 1D	Camadas	Vs _{min}	Vs _{max}	Densidade (g/cm ³)	RMS (%)
1/215	1ª	116	119	1,76	1,407%
	2ª	133	161	1,77	
	3ª	170	182	1,78	
	4ª	209	231	1,79	
	5ª	248	268	1,80	
2/215	1ª	119	123	1,76	2,040%
	2ª	132	150	1,77	
	3ª	174	187	1,78	
	4ª	198	214	1,79	
	5ª	256	277	1,80	
4/215	1ª	121	123	1,76	1,452%
	2ª	132	151	1,77	
	3ª	168	189	1,78	
	4ª	209	215	1,79	
	5ª	238	260	1,80	
1/115	1ª	122	125	1,76	2,286%
	2ª	135	179	1,77	
	3ª	187	225	1,78	
	4ª	277	307	1,79	
2/115	1ª	114	124	1,76	2,077%
	2ª	139	162	1,77	
	3ª	206	250	1,78	
4/115	1ª	122	122	1,76	2,780%
	2ª	137	169	1,77	
	3ª	200	243	1,78	

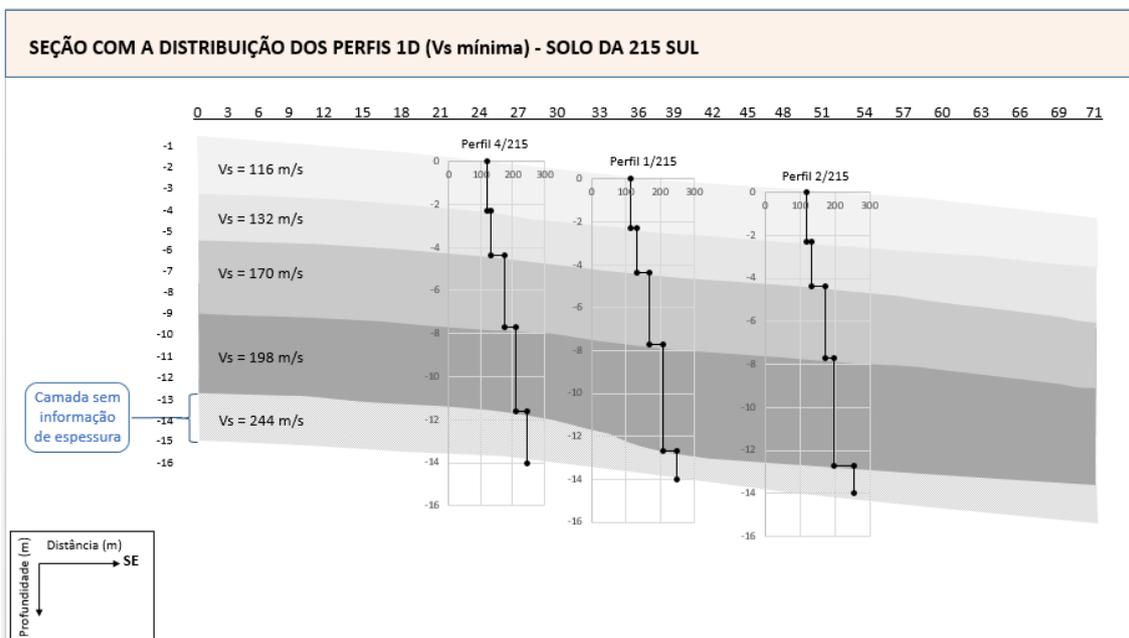


Figura 4. 22: Seção 2D de velocidades mínimas (Vsmin) da SQS 215, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.

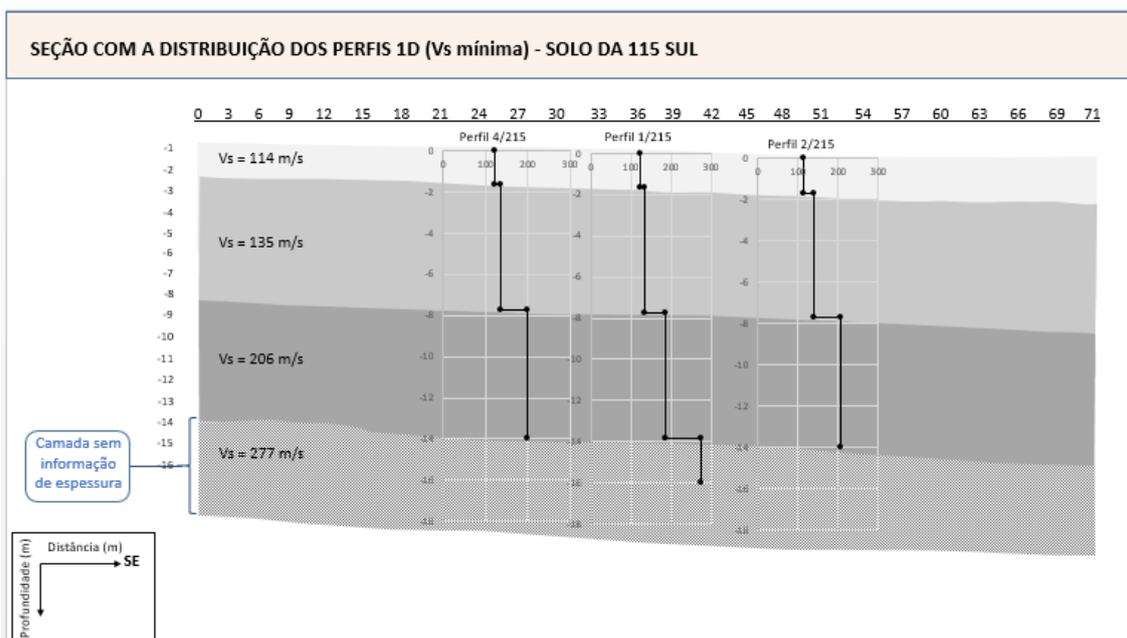


Figura 4. 23: Seção 2D de velocidades mínimas (V_{smin}) da SQS 115, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.

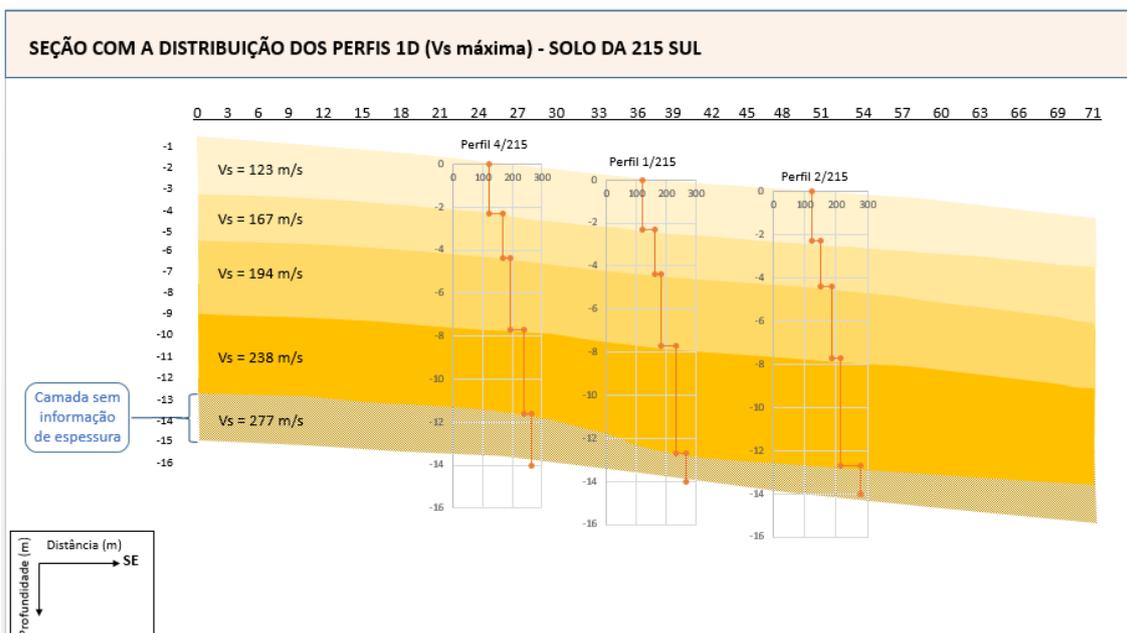


Figura 4. 24: Seção 2D de velocidades máximas (V_{smax}) da SQS 215, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.

Vale destacar, apenas como um exemplo, que segundo a Norma Portuguesa NP EN 1998-1:2010 (**Tabela 4.5**), os resultados de velocidade das ondas S podem ser utilizados para correlacionar a resistência dos maciços à ocorrência de fenômenos sísmicos como terremotos.

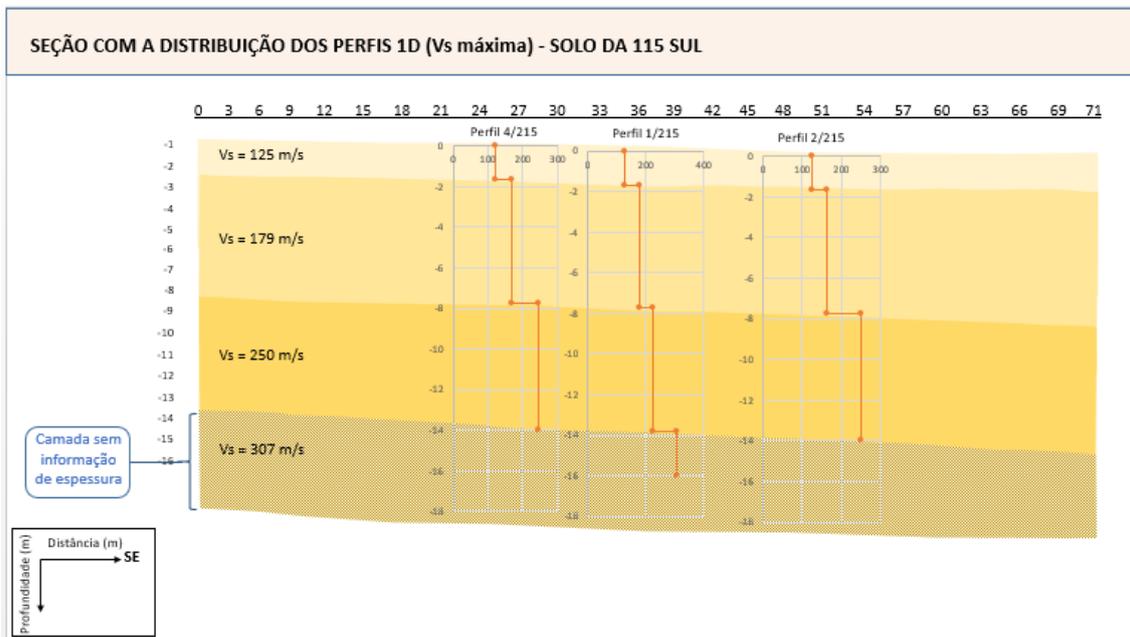


Figura 4. 25: Seção 2D de velocidades máximas (V_{smax}) da SQS 115, estimada a partir de perfis 1D obtidos pelo MASW.

A citada norma define limites de resistência nos primeiros 30 metros de profundidade de um maciço terroso, de maneira que para aplicá-la com base nos dados levantados nesse trabalho foi necessária adaptação da metodologia para seu uso até as profundidades alcançadas nos ensaios MASW realizados, ou seja, até a profundidade de 14 metros na SQS 215 e 15 metros para SQS 115 (extrapolação de 1 metro, considerando que as características geológico-geotécnicas do terreno não mudariam na profundidade de extrapolação).

Nas duas seções foram calculados valores de $V_{s,30}$ menores que 180 m/s (**Tabela 4.6**), classificando esses solos como sendo do tipo D ou depósito de solos não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura. Esta última descrição é compatível com os materiais/solos sondados na Asa Sul de Brasília/DF.

Voltando ao escopo do trabalho, ressalta-se que a densidade é, junto com as velocidades V_p e V_s , parâmetro fundamental para viabilização dos cálculos dos módulos elásticos, conforme apresentado no Capítulo II (Fundamentação Teórica). Esse parâmetro é definido como a massa por unidade de volume de solo; assim se 1 metro cúbico (m^3) de um sólido pesa 2 megagramas (Mg), a densidade de partículas desse solo será de $2 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, que também pode ser expresso em 2 gramas por centímetro cúbico (g/cm^3).

Tabela 4. 5: Tipos de terreno para a consideração da influência das condições locais na ação sísmica (NP EN 1998-1: 2010).

Tipo de Terreno	Descrição do perfil estratigráfico	Parâmetros		
		Vs,30 (m/s)	N _{SPT}	C _u (Kpa)
A	Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso que inclua, no máximo, 5 metros de material mais fraco à superfície.	> 800	-	-
B	Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade.	360 a 800	> 50	> 250
C	Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixos (cascalho) ou de argila rija com espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros.	180 a 360	15 a 50	70 a 250
D	Depósito de solos não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura.	< 180	< 15	< 70
E	Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial com valores de Vs do tipo C ou D e espessura entre cerca de 5 e 20 metros sobre um estrato mais rígido com Vs > 800 m/s.	-	-	-
S ₁ *	Depósitos constituídos ou contendo um estrato com pelo menos 10 metros de espessura de argilas ou siltes moles com um elevado índice de plasticidade (Ip > 40) e um elevado teor de água.	< 100	-	10 a 20
S ₂ *	Depósitos de solos com potencial de liquefação, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terreno não incluídos nos tipos A a E, ou S ₁ .	-	-	-

* Terrenos que necessitam estudos especiais para definição da ação sísmica.

A densidade da maioria dos grãos sólidos dos solos varia entre 2,60 a 2,75 g/cm³ (Pinto, 2006), entretanto, no caso dos latossolos os valores são relativamente mais baixos. Marcolin e Klein (2011) determinaram a densidade de diferentes latossolos vermelhos do Rio Grande do Sul, encontrando valores entre 1,04 a 1,80 g/cm³. Identificaram também a relação da argila a valores mais baixos de densidade e da areia a valores mais altos.

Tabela 4. 6: Resultados de Vs,30 calculados segundo a NP EN 1998-1: 2010.

Perfis	Posição na Seção (m)	Média da Vs,30* (m/s)
1/215	35	169
2/215	46	166
4/215	25	157
1/115	35	155
2/115	49	158
4/115	24	158

* Vs,30 é a velocidade de propagação da velocidade de corte nos 30 metros superiores do perfil do solo para deformações por corte iguais ou inferiores a 10^{-5} (unidade adimensional representando um arco expresso em radianos). Deverá ser calculada de acordo com a seguinte expressão: $V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,n} \frac{h_i}{V_i}}$ (NP EN 1998-1: 2010). Onde h_i representa a espessura em metros e V_i a velocidade das ondas de corte (para distorções igual ou inferior a 10^{-5}) da i -ésima formação ou camada existente, num total de n existente nos 30 m superiores.

No Distrito Federal, Campos *et al.* (2008) amostraram diferentes latossolos vermelhos e vermelho-amarelos na Fazenda Água Linda (FAL), localizada ao sul da área de pesquisa. Foram realizadas a amostragem do horizonte Bw desses latossolos, obtendo densidades variando entre 0,76 e 1,03 g/cm³. Em geral, o horizonte Bw é o horizonte com maior teor de argila de um latossolo.

Os resultados de densidade obtidos pela aplicação do MASW, apresentados na **Tabela 4.4**, exposta anteriormente, variaram entre 1,76 e 1,80 g/cm³, resultado compatível ao esperado para o tipo de solo sondado na Asa Sul.

4.2.3.RESULTADOS – CÁLCULO DOS MÓDULOS ELÁSTICOS

Antes de se efetuar os cálculos dos módulos elásticos, fez-se necessário organizar o conjunto de dados medidos de forma que seja possível estabelecer conectividade entre o elemento a calcular e sua representatividade espacial no perfil de solo, ou seja, cada dado deve estar relacionado a uma posição planimétrica e altimétrica.

Assim, para cada seção foram considerados 3 perfis 1D (MASW) e 1 perfil 2D (Refração Sísmica), cada qual contendo um conjunto de dados medidos. Esses, do ponto de vista do cálculo realizado, são considerados como *inputs*, sendo eles a velocidade das ondas P (Vp), a velocidade das ondas S (Vs) e a densidade (ρ). A partir desse conjunto de dados são calculados outro conjunto de dados, do qual fazem parte o módulo de Young (E), o coeficiente de Poisson (ν), o módulo de cisalhamento (G) e o coeficiente volumétrico (K), sendo esses considerados como *outputs* ou dados de saída.

Os cálculos dos parâmetros elásticos foram executados a partir da programação das fórmulas no MATLAB, software especializado na execução de cálculos numéricos e matriciais. As fórmulas usadas para o cálculo de cada parâmetro estão especificadas no Capítulo 2 (Fundamentação Teórica). A **Tabela 4.7** ilustra o procedimento descrito.

Tabela 4. 7: Apresenta o processo de cálculo dos parâmetros elásticos.

INPUT				MATLAB	OUTPUT			
Profundidade	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidade Média (Mg/m ³)		E (Mpa)	ν	G (KN/m ²)	K (Mpa)
-1	460	115	1,77	$E = Vp^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 - 2\nu) \cdot (1 + \nu)}{1 - \nu}$ $\nu = \frac{\left(\frac{Vp}{Vs}\right)^2 - 2}{2 \left(\frac{Vp}{Vs}\right)^2 - 2}$ $G = \rho \cdot Vs$ $K = \left(\rho \cdot Vp^2\right) - \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot Vs^2$	1,09968970	0,4667	23,40825	0,343321
-2	460	115	1,77		1,09968970	0,4667	23,40825	0,343321
-3	460	159	1,77		1,07699264	0,4322	44,74737	0,314869
-4	460	159	1,77		1,07699264	0,4322	44,74737	0,314869
-5	460	159	1,77		1,07699264	0,4322	44,74737	0,314869
-6	460	159	1,77		1,07699264	0,4322	44,74737	0,314869
-7	460	159	1,77		1,07699264	0,4322	44,74737	0,314869
-8	460	159	1,77		1,07699264	0,4322	44,74737	0,314869
-9	460	159	1,77		1,07699264	0,4322	44,74737	0,314869
-10	460	159	1,77		1,07699264	0,4322	44,74737	0,314869
-11	460	159	1,77		1,07699264	0,4322	44,74737	0,314869
-12	460	159	1,77		1,07699264	0,4322	44,74737	0,314869
-13	460	159	1,77		1,07699264	0,4322	44,74737	0,314869
-14	1670	159	1,77		14,76417601	0,4954	44,74737	4,876690
-15	1670	159	1,77		14,76417601	0,4954	44,74737	4,876690
-16	1670	159	1,77		14,76417601	0,4954	44,74737	4,876690
-17	1670	159	1,77		14,76417601	0,4954	44,74737	4,876690
-18	1670	159	1,77		14,76417601	0,4954	44,74737	4,876690
-19	1670	159	1,77		14,76417601	0,4954	44,74737	4,876690
-20	1670	159	1,77		14,76417601	0,4954	44,74737	4,876690

Como foram definidos valores de velocidades mínimas e máximas, para cada parâmetro foram calculados um valor máximo e um valor mínimo. Assim para facilitar a consolidação dos resultados convencionou-se utilizar os valores de E e G máximos, por estarem correlacionados com a definição de valores de consistência, logo, interessa particularmente o conhecimento dos maiores valores de consistência.

No caso de ν , foram considerados os valores médios, visto que a variação entre os valores máximos e mínimos foi mínima, da ordem da 3ª casa decimal, logo, o valor médio não alteraria os resultados de seu uso em outros cálculos e algoritmos.

Por fim, no caso do K foram utilizados os valores mínimos, por sua relação com a resistência a compressibilidade de um solo, interessando na análise, particularmente, a mínima resistência à compressibilidade do solo antes de sua deformação.

As **Tabelas 4.8 e 4.9** consolidam todos os resultados numéricos calculados a partir dos levantamentos geofísicos executados na presente pesquisa, sendo a primeira tabela uma compilação dos resultados da aquisição na SQS 215 e a segunda tabela a compilação dos resultados adquiridos na SQS 115. Além disso, nas **Figuras 4.26 e 4.27** podem ser visualizadas a distribuição desses parâmetros em profundidade na forma de seções.

Os valores de E calculados na seção da SQS 215 variaram entre valores iguais a 0,9 e 13,7 Mpa. Assim, segundo Pinto (2006), considerando apenas o módulo de elasticidade, existiriam duas camadas identificadas quanto a consistência: uma muito mole até 12 metros de profundidade e outra rija a partir de então. Além disso, os valores de E descartariam a

presença de rocha nessa última camada, mesmo que alterada, visto que as ardósias, rochas do embasamento local, teriam valores da ordem de giga pascal.

Tabela 4. 8 Apresenta o resultado do cálculo dos parâmetros elásticos do Perfil nº 1/215.

Profundidade	Perfil nº 1/215				Perfil nº 2/215				Perfil nº 4/215			
	E (Mpa)	ν	G (KN/m ²)	K (Mpa)	E (Mpa)	ν	G (KN/m ²)	K (Mpa)	E (Mpa)	ν	G (KN/m ²)	K (Mpa)
-1	0,9	0,46	25	0,26	0,9	0,45	27	0,26	0,9	0,45	27	0,26
-2	0,9	0,46	25	0,26	0,9	0,45	27	0,26	0,9	0,45	27	0,26
-3	0,9	0,43	46	0,24	0,9	0,43	40	0,25	0,9	0,43	40	0,25
-4	0,9	0,43	46	0,24	0,9	0,43	40	0,25	0,9	0,43	40	0,25
-5	0,8	0,39	59	0,22	0,8	0,38	62	0,22	0,8	0,39	64	0,22
-6	0,8	0,39	59	0,22	0,8	0,38	62	0,22	0,8	0,39	64	0,22
-7	0,8	0,39	59	0,22	0,8	0,38	62	0,22	0,8	0,39	64	0,22
-8	0,8	0,39	59	0,22	0,8	0,38	62	0,22	0,8	0,39	64	0,22
-9	0,8	0,30	96	0,18	0,8	0,33	82	0,19	0,8	0,32	83	0,19
-10	0,8	0,30	96	0,18	0,8	0,33	82	0,19	0,8	0,32	83	0,19
-11	0,8	0,30	96	0,18	0,8	0,33	82	0,19	0,8	0,32	83	0,19
-12	0,8	0,30	96	0,18	0,8	0,33	82	0,19	13,7	0,49	122	4,45
-13	13,7	0,49	129	4,44	13,7	0,49	138	4,43	13,7	0,49	122	4,45

Legenda: Módulo de Young (E), Razão de Poisson (ν), Módulo de cisalhamento (G) e Coeficiente volumétrico (K).

Tabela 4. 9: Apresenta o resultado do cálculo dos parâmetros elásticos do Perfil nº 1/115.

Profundidade	Perfil nº 1/115				Perfil nº 2/115				Perfil nº 4/115			
	E (Mpa)	ν	G (KN/m ²)	K (Mpa)	E (Mpa)	ν	G (KN/m ²)	K (Mpa)	E (Mpa)	ν	G (KN/m ²)	K (Mpa)
-1	0,8	0,45	28	0,25	0,8	0,45	27	0,25	0,8	0,45	26	0,25
-2	0,8	0,45	28	0,25	0,8	0,45	27	0,25	0,8	0,45	26	0,25
-3	0,8	0,41	57	0,21	0,8	0,42	46	0,23	0,8	0,42	51	0,22
-4	0,8	0,41	57	0,21	0,8	0,42	46	0,23	0,8	0,42	51	0,22
-5	0,8	0,41	57	0,21	0,8	0,42	46	0,23	0,8	0,42	51	0,22
-6	0,8	0,41	57	0,21	0,8	0,42	46	0,23	0,8	0,42	51	0,22
-7	0,8	0,41	57	0,21	0,8	0,42	46	0,23	0,8	0,42	51	0,22
-8	0,8	0,41	57	0,21	0,8	0,42	46	0,23	0,8	0,42	51	0,22
-9	0,8	0,32	90	0,17	0,8	0,26	111	0,14	0,8	0,28	105	0,15
-10	0,8	0,32	90	0,17	0,8	0,26	111	0,14	0,8	0,28	105	0,15
-11	0,8	0,32	90	0,17	0,8	0,26	111	0,14	0,8	0,28	105	0,15
-12	0,8	0,32	90	0,17	0,8	0,26	111	0,14	0,8	0,28	105	0,15
-13	0,8	0,32	90	0,17	0,8	0,26	111	0,14	0,8	0,28	105	0,15
-14	12,5	0,48	169	3,98	12,5	0,48	169	3,98	12,5	0,48	169	3,98

Legenda: Módulo de Young (E), Razão de Poisson (ν), Módulo de cisalhamento (G) e Coeficiente volumétrico (K).

Já com relação aos valores de G, na seção da SQS 215 foram identificadas 4 camadas: a primeira até 2 metros de profundidade, com valor máximo igual a 27 KN/m²; a segunda até o 8^a metro de profundidade, com valor máximo de 64 KN/m²; a terceira até 12 metros de profundidade, com valor máximo de 86 KN/m², e a última, a partir de então, com valor igual a 138 KN/m². Desta forma, segundo correlação Simons e Menzies (1981), apresentada na **Tabela 4.10**, existiriam 4 camadas com consistências variando de mole a rija.

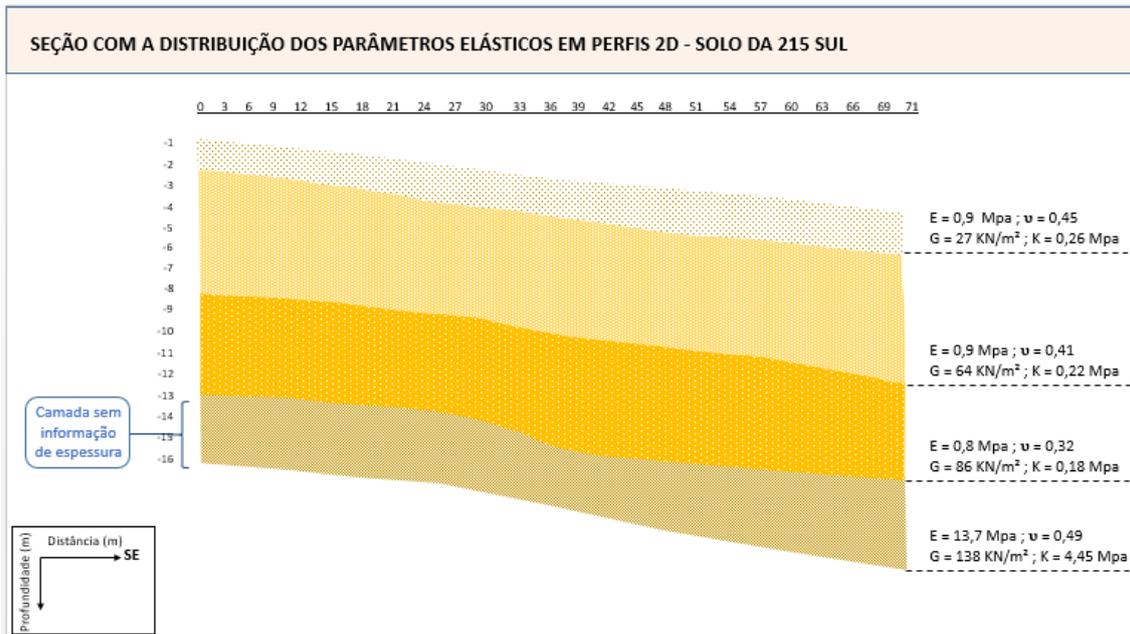


Figura 4. 26: Apresenta a seção contendo a distribuição dos valores dos parâmetros elásticos calculados na SQS 215.

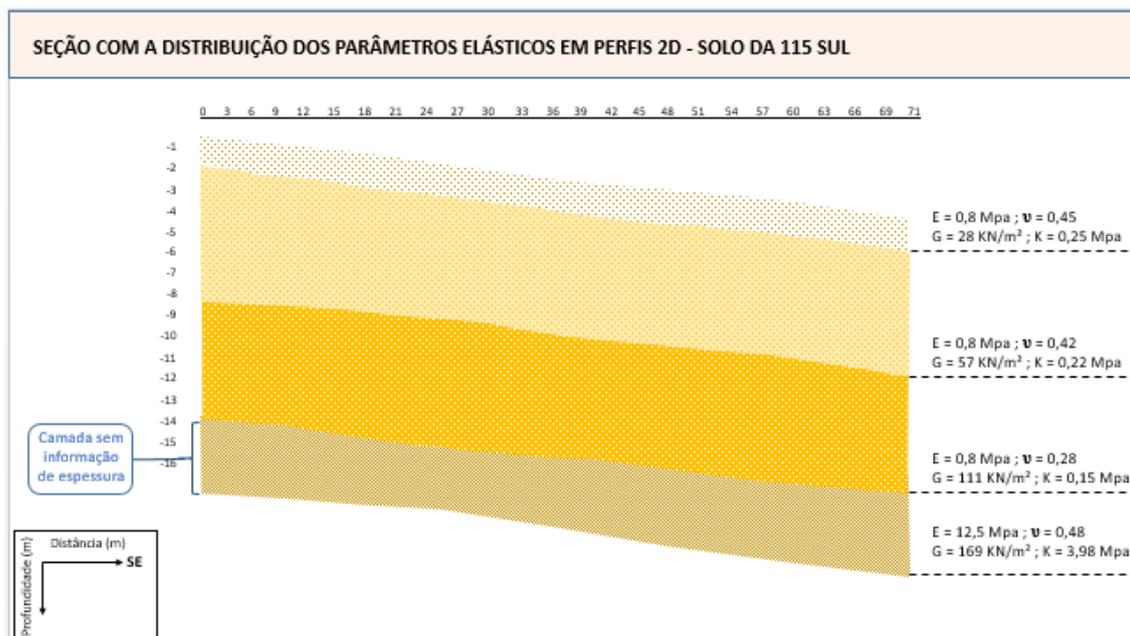


Figura 4. 27: Apresenta a seção contendo a distribuição dos valores dos parâmetros elásticos calculados na SQS 115.

Os valores de ν calculados na seção da SQS 215 variaram entre 0,41 a 0,45 nos primeiros 4 metros, valores que podem ser interpretados ou como argila ou como silte ou mesmo a mistura das duas frações granulométricas, conforme correlação Teixeira & Godoy (1996) apresentada na **Tabela 4.11**. Já nos 7 metros seguintes, os valores de ν são iguais a 0,32, valor característico da fração silte. A partir de então, o valor obtido é igual a 0,49 podendo

ser interpretado da mesma forma que a parte mais superficial da seção. Esse valor pode também ser interpretado como argila saturada.

Os valores de K, na seção da SQS 215, variaram entre 0,18 a 0,26 MPa até 12 metros de profundidade e a partir de então se observa também um grande salto no valor (mais de 20 vezes) de compressibilidade, chegando a valores da ordem de 4,45 MPa. Tal fato pode indicar a presença de água, visto que em solos saturados, graças a baixa compressibilidade da água, o módulo volumétrico total se torna muito mais alto que o efetivo (Nader, 2015).

Os valores de E calculados na seção da SQS 115 variaram entre valores iguais a 0,8 e 12,7 Mpa. Assim, segundo Pinto (2006), considerando apenas o módulo de elasticidade, existiriam duas camadas quanto a consistência: uma muito mole até 13 metros de profundidade e outra rija a partir de então. Além disso, os valores de E, assim como descrito na seção da SQS 215, descartariam a presença de rocha nessa última camada.

Já com relação aos valores de G, na seção da SQS 115 foram identificadas 4 camadas: a primeira até 2 metros de profundidade, com valor máximo igual a 28 KN/m²; a segunda até o 8ª metro de profundidade, com valor máximo de 57 KN/m²; a terceira até 13 metros de profundidade, com valor máximo de 111 KN/m², e a última, a partir de então, com valor igual a 169 KN/m².

Desta forma, segundo correlação Simons & Menzies (1981), existiriam 4 camadas com consistências variando de mole a muito rija. Vale a pena destacar, que nessa seção, o máximo de profundidade alcançada nas sondagens mecânicas foi 13 metros e o observado na seção geofísica, nessa profundidade, mostrou um valor de consistência muito rija, o que demonstra, nesse caso, que a aquisição geofísica poderia ser correlacionada ao atingimento da camada impenetrável do ensaio SPT.

Tabela 4. 10: Relação entre consistência e resistência a partir de verificação no campo (Simons e Menzies, 1981).

Consistência	Crítérios de verificação	Resistência ao cisalhamento (KN/m ²)
Muito Rija	Quebradiça ou muito dura	> 150
Rija	Não pode ser moldada com os dedos	75 a 150
Média	Pode ser moldada com os dedos, fazendo-se a força	40 a 75
Mole	Facilmente moldável com os dedos	20 a 40
Muito mole	Flui entre os dedos quando espremida	< 20

Tabela 4. 11: Tipos de solos e sua correlação com a Razão de *Poisson* (Teixeira e Godoy, 1996).

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

Os valores de ν calculados na seção da SQS 115 variaram entre 0,42 a 0,45 nos primeiros 8 metros, valores que podem ser interpretados ou como argila ou como silte ou mesmo a mistura das duas frações granulométricas, conforme correlação Teixeira & Godoy (1996). Já nos 4 metros seguintes, os valores de ν são iguais a 0,28, valor característico da fração argila. A partir de então, o valor obtido é igual a 0,48 podendo ser interpretado da mesma forma que a parte mais superficial da seção.

Por fim, os valores de K, na seção da SQS 115, variaram entre 0,15 a 0,25 MPa até 13 metros de profundidade e a partir de então se observa um salto de mais de 20 vezes no valor de compressibilidade, chegando a valores da ordem de 3,98 MPa. Tal fato, assim como na seção da SQS 215, indicaria a provável presença de água no subsolo.

Com base nas interpretações, ora apresentadas, foi possível construir uma seção geológico-geotécnica na SQS 215 e outra na SQS 115, que podem ser observadas nas **Figuras 4.28 e 4.29**.

Ressalta-se que tais seções foram construídas com base somente nas aquisições sísmicas, logo, isenta de interpretações fornecidas por meio dos dados obtidos nas sondagens geotécnicas e ensaios SPT. Assim, poder-se-á comparar os resultados alcançados pelas duas formas de aquisição de dados geotécnicos, ou seja, comparar os resultados pelos métodos direto e indireto.

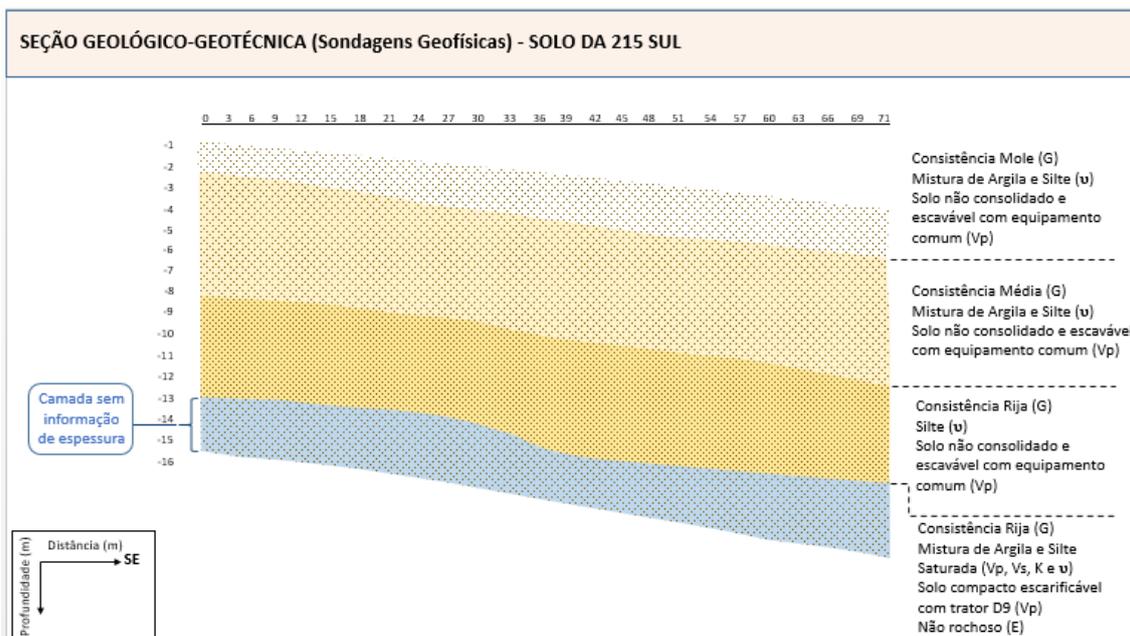


Figura 4. 28: Seção geológico-geotécnica da 215 Sul, construída com dados sísmicos.

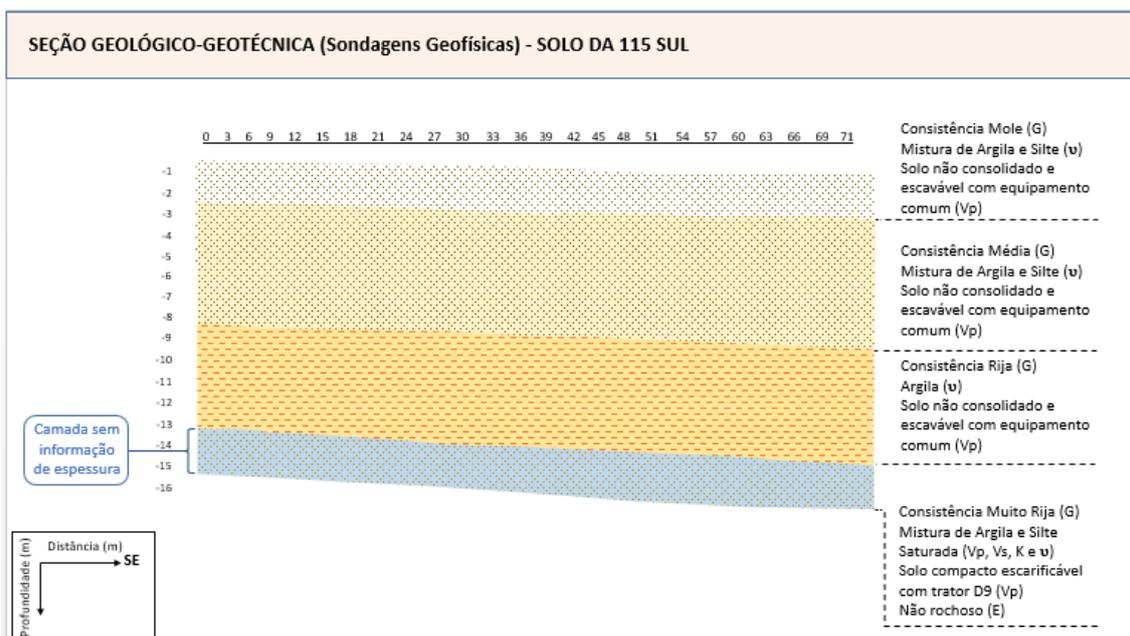


Figura 4. 29: Seção geológico-geotécnica da 115 Sul, construída com dados sísmicos.

4.3. INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA A PARTIR DA ANÁLISE INTEGRADA

Antes de apresentar as seções geológico-geotécnicas com a integração dos resultados alcançados, obtidos pelos métodos diretos (sondagens mecânicas e SPT) e indiretos (Refração Sísmicas e MASW), considera-se essencial a compilação desses em quadro esquemático (**Tabela 4.12**), com o intuito de facilitar a visualização de todos os dados e, desta forma, ressaltar as principais diferenças e similaridades dos resultados alcançados. Além disso, na **Figura 4.30** estão dispostas lado a lado as seções geológico-geotécnicas construídas com os diferentes métodos, facilitando ao leitor uma análise comparativa dos resultados.

Cada camada interpretada nas seções da SQS 215 e SQS 115, agregam as informações listadas a seguir: espessura, textura, saturação, NSPT, consistência, velocidades das ondas P e S, densidade, módulo elástico, razão de *poisson*, módulo de cisalhamento e módulo volumétrico. Considerou-se que a profundidade máxima das seções deveria ser definida com base na sobreposição de todas as informações elencadas, por exemplo, na seção da SQS 215 os furos de sondagem alcançaram 23 metros de profundidade, entretanto, a profundidade máxima da sondagem geofísica ficou limitada a 13 metros. Assim, a profundidade máxima da seção foi 13 metros, pois em maior profundidade só haveria informações pelo método direto. Cada uma dessas seções pode ser observada nas **Figuras 4.31 e 4.32**.

Para classificar a textura foram utilizados os dados obtidos pelo método direto, pois feições como matéria orgânica e concreções não foram identificados pelo método geofísico. Inclusive, deve ser destacado que as granulometrias estimadas pelos métodos geofísicos não foram capazes de distinguir a textura conclusivamente, apesar de indicar valores aproximados aos classificados nos métodos diretos.

Em contrapartida, com relação à saturação do solo por água, em ambas as seções geofísicas os resultados indicaram com boa precisão o início da camada saturada, quando comparados com as sondagens diretas. Foi verificado que o nível d'água indicado nas sondagens mecânicas estava aproximadamente 2 metros acima do indicado nas sondagens geofísicas. Infere-se que esta diferença decorre da época em que foram realizadas as investigações; no caso das sondagens mecânicas no final do período de chuvas e no caso das sondagens geofísicas no final do período de seca, logo, seria natural que se encontrasse o nível d'água um pouco mais profundo durante a investigação geofísica.

Com relação consistência foram considerados os valores calculados a partir dos dados medidos nas sondagens geofísicas, visto que os ensaios SPT só dão a resistência em uma única direção (no sentido da penetração), enquanto na associação dos parâmetros E e G as diferentes direções da resistência estão melhor caracterizadas.

Tabela 4. 12: Quadro esquemático para comparação dos dados adquiridos pelos métodos diretos e indiretos na pesquisa.

Seção Geológico-Geotécnica da 215 Sul																		
Camadas	Dados Adquiridos por métodos diretos					Dados Adquiridos por métodos indiretos												
	Espessura (m)	Textura ¹	Saturação ²	NSPT ³	Consistência ⁴	Espessura (m)	Textura ⁵	Saturação ⁶	Consistência ⁷	Equipamento de Escavação ⁸	Vp ⁹	Vsmin ¹⁰	Vsmax ¹¹	ρ^{12}	E ¹³	ν^{14}	G ¹⁵	K ¹⁶
1ª	2	Argila vermelha com matéria orgânica	ñ-saturada	0-4	Mole	2	Mistura de argila e silte	ñ-saturada	Mole	Comum (1ª categoria)	411	116	123	1,76	0,9	0,45	27	0,26
2ª	10	Argila siltosa vermelha	ñ-saturada	5-15	Mole	6	Mistura de argila e silte	ñ-saturada	Média	Comum (1ª categoria)	411	132	187	1,77	0,9	0,41	64	0,22
3ª	4	Argila siltosa vermelha	saturada	5-15	Média a Rija	4	Silte	ñ-saturada	Rija	Comum (1ª categoria)	411	198	231	1,78	0,8	0,32	86	0,18
4ª	1	Argila siltosa com concreção laterítica	saturada	5-15	Média a Rija	1	Mistura de argila e silte	saturada	Rija	Escavável com trator D9 (1ª categoria)	1601	248	268	1,79	13,7	0,49	138	4,45
5ª	3	Silte argiloso rosa	saturada	> 15	Rija a Muito rija	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Seção Geológico-Geotécnica da 115 Sul																		
Camadas	Dados pelos métodos diretos					Dados pelos métodos indiretos												
	Espessura (m)	Textura ¹	Saturação ²	NSPT ³	Consistência ⁴	Espessura (m)	Textura ⁵	Saturação ⁶	Consistência ⁷	Equipamento de Escavação ⁸	Vp ⁹	Vsmin ¹⁰	Vsmax ¹¹	ρ^{12}	E ¹³	ν^{14}	G ¹⁵	K ¹⁶
1ª	6	Argila siltosa vermelha	ñ-saturada	0-4	Mole	2	Mistura de argila e silte	ñ-saturada	Mole	Comum (1ª categoria)	405	114	125	1,76	0,8	0,45	28	0,25
2ª	1	Argila siltosa com concreção laterítica	ñ-saturada	5-15	Média a Rija	6	Mistura de argila e silte	ñ-saturada	Média	Comum (1ª categoria)	405	135	179	1,77	0,8	0,42	57	0,22
3ª	5	Silte argiloso	ñ-saturada	> 15	Rija a Muito rija	5	Argila	ñ-saturada	Rija	Comum (1ª categoria)	405	187	250	1,78	0,8	0,28	111	0,15
4ª	1	Silte argiloso	saturada	> 15	Rija a Muito rija	1	Mistura de argila e silte	saturada	Muito Rija	Escavável com trator D9 (1ª categoria)	1532	277	307	1,79	12,5	0,48	169	3,98

Descrição da forma de identificação, medição e cálculo dos dados:

- [1] Textura é estimada a partir de identificação visual/táctil e ensaio granulométrico.
- [2] Saturação estimada pela identificação do nível durante a perfuração de sondagem mecânica.
- [3] Faixas definidas por Oliveira, 1996.
- [4] A consistência é estimada com base na correlação com os resultados NSPT, segundo ABNT NBR 7550:1972.
- [5] A textura dos solos está relacionada com Razão de Poisson, conforme correlação proposta por Teixeira & Godoy, 1996.
- [6] A saturação foi estimada com base no aumento significativo do K (conforme proposto por Nader, 2015) e Vp, a partir da correlação proposta por Souza, 1998.
- [7] A Consistência é estimada com base no módulo de elasticidade, correlação proposta por Pinto (2002), e no módulo de cisalhamento, correlação proposta por Simons & Menzies, 1981.
- [8] O Equipamento de escavação foi estimado com base na velocidade Vp, a partir da correlação proposta por Redaelli & Cerello, 1998.
- [9] Vp, m/s, é medida por meio do ensaio de refração sísmica.
- [10] Vs, m/s, mínima é estimada a partir do ensaio MASW.
- [11] Vs, m/s, máxima é estimada a partir do ensaio MASW.
- [12] A ρ , em g/cm³, é estimada a partir do ensaio MASW.
- [13] O módulo elástico, em MPa, é calculado a partir da fórmula proposta por Duarte, 1997.
- [14] A razão de Poisson é calculada a partir da fórmula proposta por Christensen, 1996.
- [15] O módulo de cisalhamento, em KN/m², é calculada a partir da fórmula proposta por Duarte, 1997.
- [16] O módulo volumétrico, em MPa, é calculado a partir da fórmula proposta por Duarte, 1997.

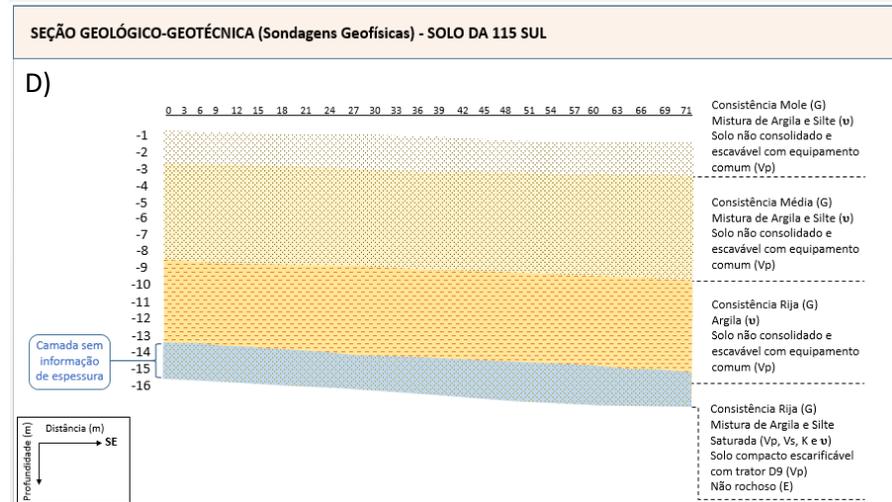
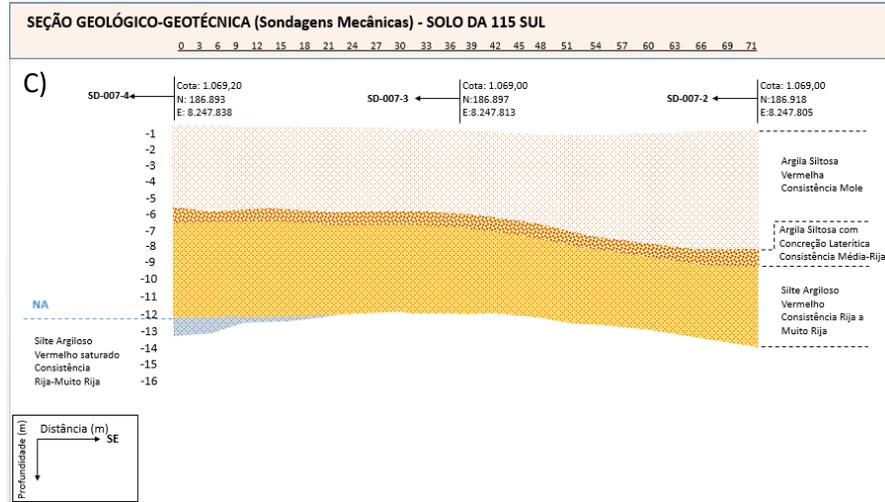
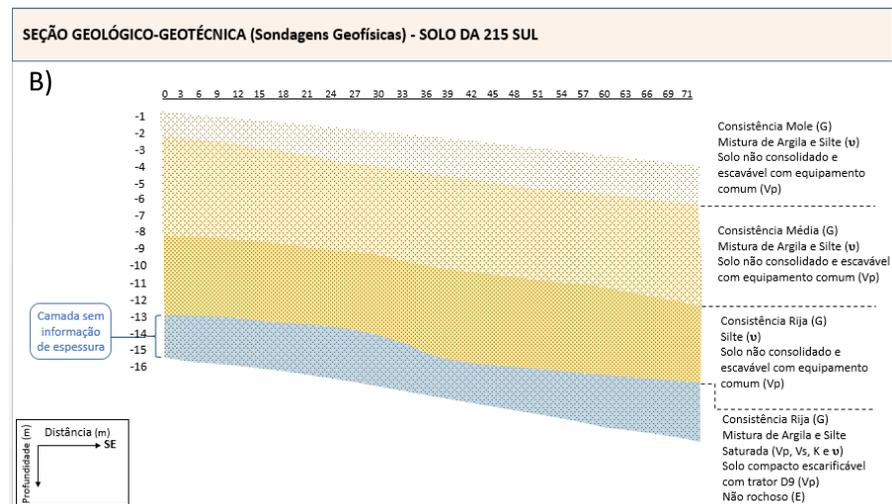
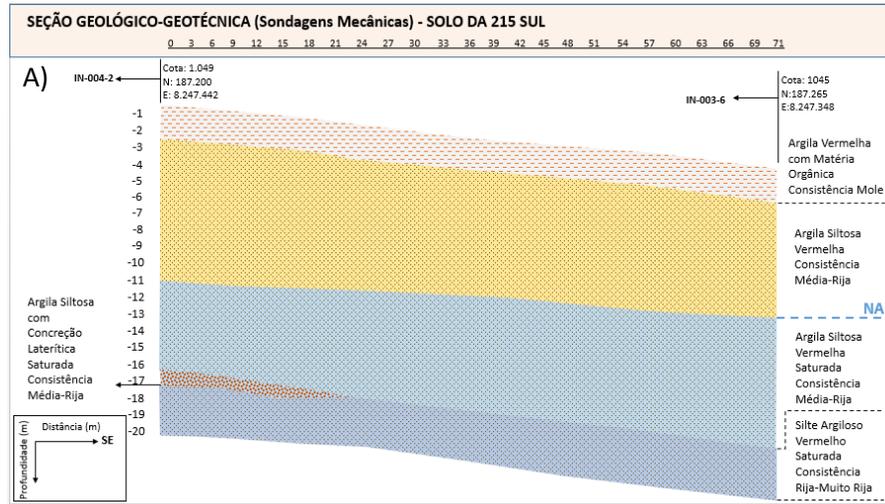


Figura 4. 30: Seções Geológico-geotécnicas: A) seção da SQS 215 construída com dados de sondagem direta; B) seção da SQS 215 construída com dados de sondagens geofísicas; C) seção da SQS 115 construída com dados de sondagem direta; e D) seção da SQS 215 construída com dados de sondagens geofísicas.

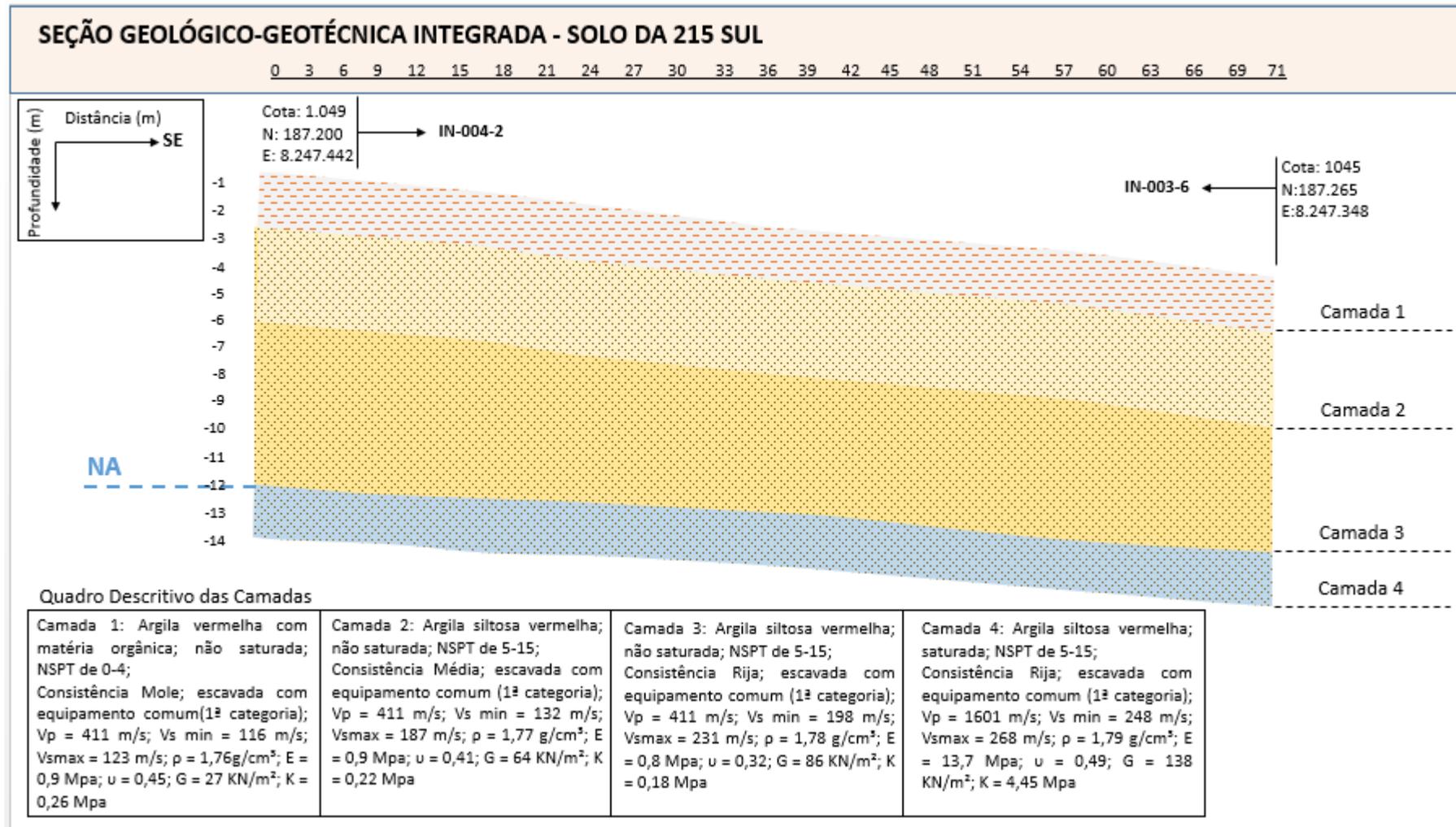


Figura 4. 31: Seção Geológico-geotécnica da 215 Sul executada a partir da integração de dados obtidos pelos métodos diretos e indiretos.

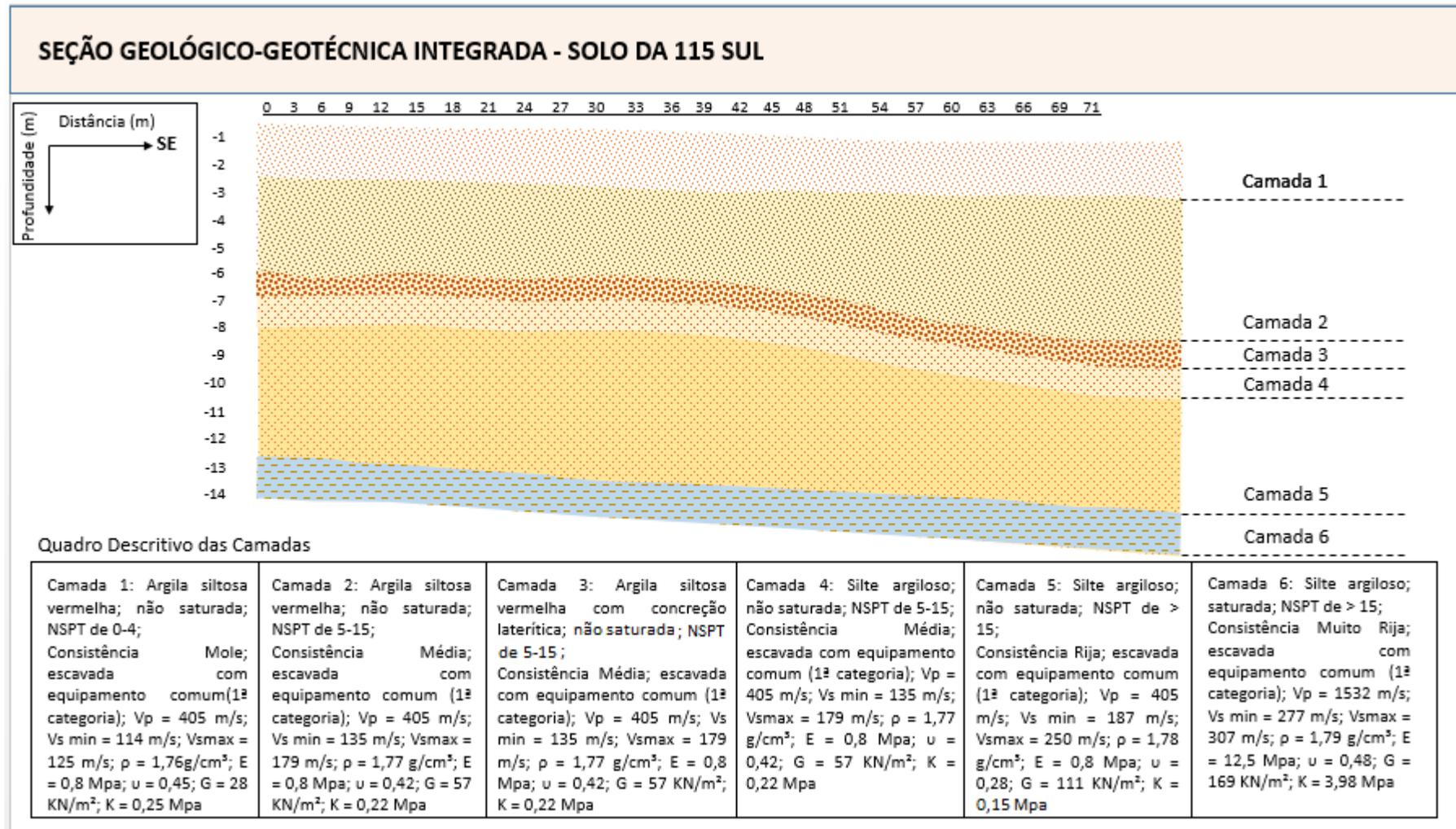


Figura 4. 32: Seção Geológico-geotécnica da 115 Sul executada a partir da integração de dados obtidos pelos métodos diretos e indiretos.

5. CONCLUSÕES

Por meio das investigações sísmicas realizadas nesta pesquisa foi possível caracterizar geológico-geotecnicamente os solos, das quadras SQS 215 e SQS 115, até profundidades de 13 e 14 metros respectivamente.

A configuração da linha de perfilagem sísmica permitiu a aquisição de dados de Refração Sísmica e MASW em um único levantamento, ajustado às características do meio urbano e solos de Brasília, e atendeu à finalidade da investigação, que foi o levantamento de dados para o cálculo dos parâmetros elásticos das seções sondadas.

Os resultados da aplicação dos métodos de Refração Sísmica e MASW, quando avaliados em conjunto, foram capazes de distinguir os diferentes estratos e características dos solos, com boa correlação com resultados das sondagens mecânicas e ensaio SPT existentes na área de estudo.

A aquisição geofísica resultou na obtenção de diversos parâmetros que possibilitaram individualmente e em conjunto interpretar a geologia e geotecnia dos solos sondados. Esses parâmetros são: a velocidade das ondas P (V_p), a velocidade das ondas S (V_s), a densidade (ρ), o módulo de Young (E), o módulo de cisalhamento (G), o coeficiente de Poisson (ν) e o coeficiente volumétrico (K).

A V_p indicou, em ambas seções, que existiam dois estratos com características distintas quanto à resistência à escavação: uma camada escavável com equipamento comum e outra apenas escarificável com tratores de maior porte, do tipo D9. Além disso, mostrou um nítido contraste de velocidades entre as duas camadas encontradas, o que levou duas interpretações possíveis: que o contraste poderia ser decorrente da presença de água ou decorrente a presença de embasamento rochoso próximo à superfície do terreno.

A V_s poderia, por exemplo, ser utilizada para qualificar o terreno quanto à resistência a fenômenos sísmicos como terremotos. Apesar de não ser o escopo desse trabalho, foi realizada a análise a título de sugestão como pesquisas futura. Assim, pela análise conjunta da V_{s30} e NSPT os solos sondados foram classificados como tipo D ou solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura. Tal classificação, resultaria a maiores restrições à construção de edificações nesse solo, caso a área de estudo estivesse localizado em zona sísmológica mais ativa, como em Portugal, local onde é obedecida a Normativa NP EN 1998-1: 2010, que convalida essa correlação.

Os valores de E calculados na seção possibilitaram a classificação dos solos quanto à consistência. Além disso, pela avaliação dos valores de E foi possível descartar a possibilidade da presença de rocha nas últimas camadas das duas seções, indicando, então, que o aumento da V_p deveria ser mesmo ocasionado pela presença de uma camada saturada no subsolo sondado.

Já com relação aos valores de G , obteve-se valores maiores de consistência do que aqueles correlacionados com E . Apesar disso, a consistência dos solos foi classificada avaliando os parâmetros G e E em conjunto, considerando o fato de que a resistência de um solo será diferente dependendo da direção de aplicação de um esforço ou tensão.

Os valores de ν calculados foram usados principalmente para confirmar o caráter argilo-siltoso do solo, frações granulométricas identificadas nas sondagens mecânicas existentes no local.

Já os valores de K , corroboraram quanto à interpretação de que os estratos mais basais das seções sondadas eram saturados, visto que nessas camadas foi observado um salto de mais de 20 vezes no valor de compressibilidade, em ambas as seções.

Além dos resultados obtidos somente nas aquisições geofísicas, a integração desses resultados com aqueles adquiridos nas sondagens mecânicas, propiciou o detalhamento maior da seção geológico-geotécnica quanto à classificação textural e identificação da camada laterítica e orgânica do solo, além disso, permitiu a comparação de outras propriedades do solo como consistência e saturação.

Conclui-se, portanto, que os métodos de Refração Sísmica e MASW podem ser utilizados para a caracterização de solos e interpretação geológico-geotécnica a partir da observação dos parâmetros medidos e calculados na forma apresentada nessa Dissertação.

Além disso, as investigações geofísicas, aqui detalhadas, apresentaram a distribuição dos módulos elásticos dos solos sondados, a profundidades de até 14 metros, o que permitiria, por exemplo, a execução de cálculos de estruturas de diferentes obras de infraestruturas urbanas, como linhas de transmissão subterrâneas, sistemas viários, sistemas de águas pluviais e esgoto, obras de arte de menor porte, sistemas de telefonia, garagens subterrâneas e iluminação, entre outros. Destaca-se que na maioria dessas obras a profundidade de investigação dificilmente passa dos 10 metros.

No caso de obras do porte do túnel do metro executado na Asa Sul de Brasília, a configuração da aquisição sísmica realizada nesse estudo não permitiria o alcance das profundidades similares às investigadas na obra em questão, considerando que a maior cobertura desse túnel alcançou a espessura de 16 metros e o diâmetro médio do túnel foi de 9,2 metros, resultando em um valor mínimo de 25,2 metros de espessura a ser investigado desde a superfície (Blanco, 1995).

Ressalta-se, entretanto, que aumentando o tamanho da linha seria viável o alcance de maiores profundidades pelo método da Refração Sísmica, ou seja, pela duplicação da linha, por exemplo, mantendo-se a mesma fonte, seria possível obter seções com até 30 metros de profundidade.

Já com relação ao MASW, no entanto, seria necessário testar outras fontes, que produzissem frequências mais baixas, e, associado a isso, substituir os geofones de 14 Hz por

outros capazes de detectar frequências mais baixas (4,5 Hz), obtendo, então, o alcance de maiores profundidades.

Sugere-se, portanto, o desenvolvimento futuro de novas pesquisas para testar a proposta aqui apresentada, dando continuidade a esta e outras pesquisas desse tipo no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, do Instituto de Geociências (IG), da Universidade de Brasília (UnB).

Sugere-se, também e por fim, que novas pesquisas confrontem os parâmetros calculados a partir dos dados obtidos pelos métodos de Refração Sísmica e MASW com aqueles obtidos em outros ensaios de campo e laboratório, como CPTU, coluna ressonante, torção cíclica, triaxial, etc.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M. Origem e Evolução da Plataforma Brasileira. Boletim nº 241. Rio de Janeiro: Divisão de Geologia e Mineralogia, 1967a. p. 29-36.
- ALMEIDA, F. F. M. Nota Sobre o Pré-cambriano da Região Central de Goiás. Boletim nº 26. Curitiba: Boletim Paranaense de Geociências, 1967b. p. 19-22.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 3441-05: Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Tests of Soil. Pensilvania: 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 3999-91: Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus. Pensilvania: 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 4015-92: Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method. Pensilvania: 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 4428 / D 4428 M: Standard Test Methods for Cross Hole Seismic Testing. Pensilvania: 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 5777-00: Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. Pensilvania: 2011.
- ANDERSON, D.L. Theory of the Earth. EUA: Blackwell Scientific Publications, 1989. p. 366.
- AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles, Proceedings 5th Pan. Buenos Aires: Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, 1995.
- APAZA, M. A. F.; BARROS, J. M. C. Obtenção do Módulo de Cisalhamento Máximo pela Técnica SASW. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 15, 2010, Gramados. Conference Paper. ABMS, 2010.
- ARAGÃO, C. J. G. Propriedades geotécnicas de alguns depósitos de argila mole na área do Grande Rio. 1975. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), PUC, Rio de Janeiro, 1975.
- ARAÚJO FILHO, J. O. The Pirineus Syntaxis: an Example of the Intersection of two Brasiliano Fold-Thrust Belts in Central Brazil and its Implications for the Tectonic Evolution of western Gondwana. Brazilian Journal of Geology, v. 30, n. 1, 2008.
- ARDITO, J. C. O uso do método de análise de ondas superficiais empregando fontes passivas e ativas. 2013. 112p. Dissertação (Mestrado em Geofísica), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7250: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro: 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações - Método de ensaio. Rio de Janeiro: 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro: 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro: 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12770: Solo Coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de Ensaio. Rio de Janeiro: 1992.

BAPTISTA, G. M. M. Diagnóstico ambiental e perda laminar de solos no Distrito Federal, por meio de geoprocessamento. 1997. 112p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

BAPTISTA, G.M.M. Caracterização climatológica do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UnB, Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. Vol. 1, 187-208 p., 1998.

BARBOSA, O. Geologia Econômica e Aplicada a Uma Parte do Planalto Central Brasileiro. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral/PROSPEC, Rio de Janeiro. 1963.

BLANCO, S.B. Aspectos de Geologia de Engenharia da Escavação do Metrô de Brasília – Trecho Asa Sul. 1995. 111p. Dissertação (Mestrado no Departamento de Engenharia Civil). Universidade de Brasília. Brasília, 1995.

BRIGNOLI, E. G. M.; GOTTI, M.; STOKOE, K. H. Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers. USA: Geotechnical Testing Journal, 1996. v.19.

CAMPOS, J.E.G. Hidrogeologia do Distrito Federal: Bases para Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos. Brasil: Revista Brasileira de Geociências, 2004. v.34. n. 1, 41-48p.

CAMPOS, P.M; LACERDA, M. P. C.; PAPA, R. D. A.; GUIMARÃES, E. M.; COSTA NETO, F. Difractometria de raios-X aplicada na identificação de gipsita e caulinita em latossolos do Distrito Federal. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9, 2008, Brasília. Anais. Brasília: Parla Mundi, 2008. 01-07.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A.; FREITAS-SILVA, F. H.; MARTINS-FERREIRA, M. A. C. Geologia do Grupo Paranoá na Porção Externa da Faixa Brasília. Brasil: Revista Brasileira de Geociências, 2013. v.43. n. 3. 461-476.

CHRISTENSEN, N. I. Poisson's ratio and crustal seismology. Journal of Geophysical Research, 1996. 101(B2): 3.139-3.156.

CRUZ, R. C. Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada. 2008. 216p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, 1978, Recife. Anais. Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, 1978. v.1. 597-610p.

DE SOUZA MARTINS, E.; DE CARVALHO JUNIOR, O. A.; DE ASSUNÇÃO MELLO, G.; REATTO, A.; DE MORAIS, R. A. V.; PIRES, A.C. B.; GUIMARÃES, R. F. Mapeamento da superfície basal do manto de intemperismo pelo comportamento da resistividade elétrica do Distrito Federal. Brasil: Revista Brasileira de Geomorfologia, 2008. v.9. n.2, 15-28p.

DISTRITO FEDERAL, Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal, Brasília, 2009. 346p.

DUARTE O. O. Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1997. 304p.

DYVIK, R.; MADSHUS, C. Lab Measurements of G_m a x Using Bender Elements. In: KHOSLA, V. Advances in the art of testing soils under cyclic conditions. New York: ASCE, 1985. 186-196p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

EMBRAPA. Embrapa Cerrados (Brasília-DF). Mapa pedológico digital – SIG atualizado na escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004.

FARIA, A. Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D'Aliança-Alto Paraíso de Goiás. Brasília. 1995. 199p. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Brasília, 1995.

FERREIRA, C. Implementação e aplicação de transdutores piezoelétricos na determinação de velocidades de ondas sísmicas em provetes. Avaliação da Qualidade da Amostragem em Solos Residuais. 2003. 206p. Dissertação (Mestrado em Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2003.

FOTI, S. Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves. Tese (Doutorado em Geotecnia). Department of Structural, Geotechnical and Building Engineering of Politecnico di Torino. Torino, 2000.

FREITAS-SILVA F. H.; CAMPOS J. E. G. Geologia do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UnB. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. Vol. 1, 86p., 1998.

FREITAS-SILVA F. H.; CAMPOS J.E.G. Geologia do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UnB. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos do Distrito Federal. Brasília. CD-ROM. 1999.

GANDOLFO, O. C. Estimando a espessura de um aterro de RSU pelo método MASW. In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA, 6, 2014, Porto Alegre. Conference Paper. SBGF, 2014.

GEOVISION. SASW Method. Disponível em: <[HTTP://www.geovision.com/seismic.php](http://www.geovision.com/seismic.php)> Acesso em 21 Junho de 2015.

GIACHETI, H. L.; ELIS, V. R.; DE MIO, G.; CAVALCANTE, E. H. Ensaios de Campo na Investigação Geotécnica e Geoambiental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13, 2006, Curitiba. Anais. Curitiba: ABMS, 2006. Vol. Palest. 1-24p.

GIL, A. Como elaborar projetos de pesquisa. 5.ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GONÇALVES. H. H. S.; MARINHO, F. A. M.; FUTAI, M. M. Notas de aulas revisadas em 2014. Portal da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/pef0522/Pef0522-notas_de_Aula.pdf> Acesso em 17 de novembro de 2015.

HAYASHI, K. Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Waves. In: SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENVIRONMENTAL AND ENGINEERING PROBLEMS, 2003, USA. Short Course Note. USA: Environment and Engineering Geophysical Society, 2003.

INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE. NP-EM-1998-1/Eurocódigo-8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. Caparica-Pt: 2008.

ISHIHARA, K. Soil behavior in earthquake geotechnics. Washington: Clarendon Press, 1996.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. Geofísica de Exploração. Traduzido por Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KRAMER, S. L. Geotechnical Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

KULHÁNEK, O. Propagation of Seismic Waves, Lecture Notes. Sweden: Uppsala, 1993. 161p.

LAY, T.; WALLACE, T.C. Modern Global Seismology. USA: Academic Press, 1995.

LEMOS, R.C.; SANTOS, R. D. Manual de descrição e coleta no campo. 3.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1996. 83p.

LINES R.L.; TREITEL S. A review of least squares inversion and its application to geophysical problems. Netherlands: Geophysical Prospecting, 1984.

LOPES, I. M. F.; SANTOS, J. A.; ALMEIDA, I. Use of Surface waves for geotechnical Characterization of soft alluvial deposits – the Póvoa de Santa Iria Case Study. Netherlands: EAGE (European Association of Geoscientists & Engineers), 2004.

LOPES, I. M. F. Caracterização de solos no domínio das pequenas deformações. Aplicação do Método das Ondas Superficiais. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Lisboa. Lisboa, 2005.

LUKIANCHUKI, J. A. Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

MACEDO, P. M., BRANDÃO, W; ORTIGÃO, J. A. R. Geologia de engenharia no túnel da Asa Sul do Metrô de Brasília. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO OESTE, 6, 1994, Brasília. Anais. Brasília: SBG, 1994. 206-209p.

MALOVICHKO, A. A.; MALOVICHKO, D. A.; SHYLA KOV, D. Y.; BUTIRIN, P. G.; ANDERSON, N. L. Estimation of near-surface shear-wave velocities by SASW method in southeast Missouri. USA: Russian Academy of Sciences; Department of Geology and Geophysics of University of Missouri-Rolla, 2002.

MARANHA DAS NEVES, E. Mecânica de Solo. Lisboa: Secção de Folhas AEIST do Instituto Superior Técnico, 2001. 214p.

MARCOLIN, C.D; KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima-[doi: 10.4025/actasciagron.v33i2.6120](https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.6120). Maringá: Acta Scientiarum. Agronomy, 2011. v.33. n. 2, 349-354p.

MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; FARIA, T. G. Chuvas no Cerrado da Região Centro-Oeste do Brasil: Análise Histórica e tendência futura. Goiânia: Ateliê Geográfico, 2012. v.6. n.2, 112-130p.

MARINI, O. J.; FUCK, R. A.; DANNI, J. C. A. Evolução Geotectônica da Faixa Brasília e seu Embasamento. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRATON SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 1981, Salvador. Anais. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1981. 100-113p.

MARTÍN, A. M.; GOROSABEL, A. C. Resultados y Experiências de Aplicación del Método de Refracción por Microtremor (Sísmica Pasiva) para la Investigación Geofísica de las Nuevas Líneas de Metro en Madrid (España). [Madrid]: Geogaceta, 2006. v.40. 51-54p.

MELLO, V. F. B.; TEIXEIRA, A. H. - Mecânica dos Solos, Fundações e Obras de Terra. São Carlos: Serviços de Publicações da Escola de Engenharia de São Carlos, 1967.

MENKE, W. Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse theory. International Geophysics Series. San Diego: Academic Press, 1989. 289p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Projeto Zoneamento Ecológico-Econômico da Região Integrada de Desenvolvimento Econômico do Distrito Federal e Entorno. 2009.

MORTARI, D. Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no DF. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília. Brasília, 1994.

NADER, J. J. Breve Curso de Modelos Elastoplásticos. 1.ed. São Paulo: Edição do Autor (agbook), 2015. 120p.

NAZARIAN, S.; STOKOE, K. H. In situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves. In: CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 8, 1984, San Francisco. Proc. San Francisco: Prentice Hall, 1984. v.3. 31-38p.

NOGUEIRA, P. V. Integração de Sísmica de Refração e Eletroresistividade para Elaboração de um Modelo 2D do Depósito de Ferro N4WS do Complexo Serra Norte, Carajás-PA. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas). Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

NOVAES PINTO, M. Caracterização Geomorfológica do Distrito Federal. In: _____. Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. 2ª ed. Brasília: UnB, 1994. 285-320p.

OBERT, L.; DUVALL, W. Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock. New York: John Wiley & Son, 1967. 650p.

OLIVEIRA, M. G. Mapeamento Geotécnico da Asa Sul-Brasília-DF. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília. Brasília, 1996.

ORTIGÃO, J. A. R.; Collet, H. B. A eliminação de erros de atrito em ensaios de palheta em solos e rochas. São Paulo: ABMS, 1986. vol.9, n.2, 33-45p.

ORTIGÃO, J. A. R. Introdução a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. 3.ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007.

OHTA, Y.; GOTO, N. Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. New York: Earthquake engineering & structural dynamics, 1978. v.6, n.2, 167-187p.

PANITZ, J. S. P. Desenvolvimento e implementação de metodologias para a determinação da deformabilidade e tensões em maciços gnáissicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

PARK *et al.*, 2002. Parâmetros para Aquisições com MASW. Disponível em: <<http://masw.com/ACQParaTables.html>> Acesso em 14 de maio de 2014.

PENNA, A. S. D. Investigação Geotécnica: Técnicas atuais de ensaios de campo. Disponível em: <<http://ie.org.br/site/ieadm/arquivos/arqnot3896.pdf>> Acesso em: 20 de abril de 2016.

PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica de Solos em 16 Aulas. 3º Ed. São Paulo-SP: Oficina de Texto, 2006. 359p.

PITILAKIS, K. D.; ANASTASIADIS, A. J. Soil and site characterization for seismic response analysis. In: EUROPEAN CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 11, 1998, Paris. Proc. Paris: EAEE, 1998. 65-90p.

POLLARD, D. D.; FLETCHER, R. C. Fundamentals of structural geology. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

PORSANI, J. L.; RUY, Y. B.; RAMOS, F. P.; YAMANOUTH, G. R. GPR applied mapping utilities along the route of the line 4 (yellow) subway tunnel construction in São Paulo City, Brazil. Journal of Applied Geophysics, 2012. v.80, 25-31.p.

PORTAL BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep> Acesso em 28 de outubro de 2015.

RAIJ, B. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Editora Ceres - POTAFOS, 1991. 343p.

RADAELLI, L. L.; CERELLO, L. Escavações. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. Geologia de Engenharia. 6.ed. São Paulo: ABGE, 1998.

RICHART, F. E.; HALL, J. R.; WOODS, R. D. Vibrations of soils and foundations. Washington DC: Prentice Hall, 1970.

SANTA ROSA, A. N. C. Dispersão das ondas Rayleigh na Plataforma Sulamericana. Dissertação (Mestrado em Geofísica). Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará. Belém, 1989.

SEIMETZ, E. X. Estudos geofísicos ao longo do futuro trecho norte do metro de Brasília. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas). Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Brasília, 2012.

SHERIFF, R. E. & GELDART L. P. Exploration seismology: history, theory & data acquisition. New York: Cambridge University Press, 1982. v.1, 253p.

SHERIFF, R. E., GELDART, L. P. Exploration seismology. 2.ed. New York: University Press, Cambridge, 1995. 628p.

SILVA, A. J. N.; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. Viçosa: Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.31, n. 5, 853-862p.

SIMONS, N. E.; MENZIES, B. K. Introdução à Engenharia de Fundações. Traduzido por Luciano J. Moraes Jr. e Esther Horovitz de Beermann. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, [1981]. Tradução de: A short course in Foundation engineering.

- SKEMPTON, A. W.; NORTHEY, R. D., The Sensitivity of Clays. UK: Géotechnique, 1952. v.3, n.1, p. 30-53p.
- SOUZA, J. C. T. Proposta de Diretrizes Gerais para Projetos de Túneis Rodoviários. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Brasília, 2012.
- SOUZA, L. A. P.; SILVA, R. F; IYOMASA, W. S. Métodos de Investigação. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. Geologia de Engenharia. 6.ed. São Paulo: ABGE, 1998.
- STOKOE K. H. Recent Advance in Dynamic Testing of Geotechnical Materials. Austin: Department of Civil Engineering University of Texas, 1994.
- STROBBIA, C., Surface wave methods: acquisition, processing and inversion, PhD Thesis. Politecnico di Torino, Italy, 2003.
- TEIXEIRA, A. H; GODOY, N. S. Análise, projeto e execução de fundações rasas. Fundações: teoria e prática. São Paulo: Pini, 1996. v.7, 227-264p.
- TERZAGHI, F.; PECK, R. B. Soil exploration. 1ª ed. chapter 7. New York: John Willey & Sons, 1948.
- TULANE, 2012. Disponível em: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens1110/earthint.html>
Acesso em: 20 de junho 2016.
- TURCOTTE, D. L.; SCHUBERT G. Geodynamics – 2.ed. USA: Cambridge University Press, 2002. 456p.
- VALLEJO, L. I. G; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C. Ingeniería Geológica. Madrid: Prentice Hall, 2002. 374-390p.
- VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1977.
- VENTURA, D. B. R.; SOARES, J. E. P.; FUCK, R. A.; CARIDADE, L. D. C. C. Caracterização sísmica e gravimétrica da litosfera sob a linha de refração sísmica profunda de Porangatu, Província Tocantins, Brasil Central. Brasil: Revista Brasileira de Geociências, 2011. 130-140p.
- VENTURA, D. B. R. Parâmetros elásticos da crosta sob a linha de refração sísmica profunda de Porangatu. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas). Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Brasília, 2010.
- WOODS, R. D. Laboratory measurement of dynamic soil properties. In: _____. Dynamic Geotechnical Testing II. Pensilvania: ASTM International, 1994.