

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Estudo dos Efeitos de Escala em Ensaios de Penetração Dinâmica

Salete Dalla Rosa

Porto Alegre
2008

Saete Dalla Rosa

**ESTUDO DOS EFEITOS DE ESCALA EM ENSAIOS DE
PENETRAÇÃO DINÂMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Orientação: Prof. Ph. D. Fernando Schnaid.

Porto Alegre
2008

D144e Dalla Rosa, Salete
Estudo dos efeitos de escala em ensaios de penetração dinâmica /
Salete Dalla Rosa. – 2008.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do
Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2008.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Schnaid
Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Maia Rocha

1. Geotécnica – Ensaios de penetração. 2. Ensaios dinâmicos. I.
Schnaid, Fernando, orient. II. Rocha, Marcelo Maia, co-orient. III.
Título.

CDU-624.131.381(043)

SALETE DALLA ROSA

**ESTUDO DOS EFEITOS DE ESCALA EM ENSAIOS DE
PENETRAÇÃO DINÂMICA**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 30 de maio de 2008.

Prof. Fernando Schnaid
Ph. D. Oxford University, Reino Unido
Orientador

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr. Tecn. Universität Insbruck
Co-orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Edgar Odebrecht
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Jarbas Milititsky
Ph. D. University of Surrey, Reino Unido

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph.D. Concordia University, Canadá

Aos meus pais, Amando e Celenir, a quem devo tudo na vida, e as minhas irmãs Amanda e Sandra, que com certeza vão continuar a me dar forças para superar as novas etapas da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a valiosa contribuição do meu orientador e professor Fernando Schnaid, pela dedicação, interesse, disponibilidade e compreensão que sempre me disponibilizou no decorrer do desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu co-orientador professor Marcelo Maia Rocha pelo interesse, dedicação e apoio sempre demonstrados no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Edgar Odebrecht pelo estímulo, incentivo e principalmente pela maravilhosa colaboração no desenvolvimento dos equipamentos utilizados neste trabalho, sem os quais esta dissertação não seria possível.

Aos meus professores, pelos preciosos ensinamentos transmitidos durante a Graduação e neste curso de Mestrado.

Aos meus pais Amando e Celenir, que se fizeram presentes em todos os momentos desta etapa me incentivando e apoiando, com carinho e palavras de confiança, mesmo nos momentos em que eu estive ausente. Pelo exemplo de inteligência, honestidade, persistência e por me proporcionarem momentos felizes. Amo vocês!

As minhas irmãs Amanda e Sandra. A Amanda, minha colega neste curso de Mestrado, pela companhia, incentivo e conselhos, pelas horas de estudo compartilhadas, pela paciência e carinho sempre demonstrados durante o desenvolvimento deste trabalho. A Sandra, nossa futura Arquiteta, pelo incentivo, companhia, pelas boas conversas e idéias, pelo carinho e paciência sempre demonstrados durante esse período. A Bebel, nossa cachorrinha, pela alegria contagiante. Vocês fazem meus dias mais coloridos!

À toda minha família, pelo apoio durante minha jornada, em especial aos meus avós Izolina, Basílio Antônio e Irandila e meus padrinhos Beatriz e Elízio que sempre torcem por mim.

Aos colegas do PPGEC/UFRGS, Juliana, Daniel, Lucas, Talita, Milena, Leandro, Ieda, Tadeu e Anderson, pelo apoio, companheirismo e pelos momentos de descontração. Em especial a Bianca de Oliveira Lobo, pelas muitas horas compartilhadas de estudo, pela paciência, pelas críticas e pela amizade sempre presente.

À bolsista Carla Massignani Carrapatoso, pela amizade, pelos momentos de estudo e trocas de idéias, pelo auxílio na realização dos ensaios de laboratório e por estar sempre disposta a me ajudar. À todos os colegas e amigos do ENVIRONGEO/LEGG, pelos momentos de trabalho e pela ajuda, pelo companheirismo e amizade e por deixarem o nosso ambiente de trabalho mais alegre.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS pela oportunidade de realizar este curso de Mestrado.

Aos funcionários da Escola de Engenharia da UFRGS pelo apoio nas atividades realizadas, em especial a João Diniz pela colaboração nos ensaios de laboratório, a Ana Luiza Oliveira, pela paciência e colaboração para efetuar a aquisição de materiais necessários à pesquisa, a Carolina Cini e também a Rita pela ajuda e pelos momentos de descontração.

À CAPES e CNPq pelo auxílio proporcionado com a bolsa de estudos que possibilitou minha total dedicação aos estudos e ao desenvolvimento desta pesquisa.

À todos aqueles que acreditaram e torceram por mim, e que de alguma forma participaram da realização desta pesquisa.

E agradeço principalmente ao Senhor da Vida, que me guiou com serenidade nos momentos de incerteza, me deu forças nos momentos de angústia e concedeu a capacidade de realizar mais esta etapa da minha vida.

Muito obrigada!

A diferença entre o possível e o impossível está na
vontade humana.

Louis Pasteur

RESUMO

DALLA ROSA, S. Estudo dos Efeitos de Escala em Ensaios de Penetração Dinâmica. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A engenharia geotécnica brasileira é fortemente dependente dos resultados do ensaio SPT, sendo de fundamental importância aprimorar os métodos de investigação e elaboração de projetos nesta área. Embora bastante utilizado, o ensaio tem sido objeto frequente de críticas, abrangendo tanto aspectos relacionados à dispersão de resultados, quanto à dependência do operador e diversidade de equipamentos e procedimentos. Devido a estas limitações, estudos de medição de energia têm sido desenvolvidos visando a padronização do ensaio, sendo inúmeras as contribuições nesta área. Para validar abordagens baseadas em conceitos de energia e dinâmica foram projetados, construídos e testados equipamentos de penetração dentro dos princípios de escala e similaridade com o objetivo de avaliar as semelhanças geométricas envolvidas no processo de cravação dinâmica. Os equipamentos foram projetados de acordo com uma análise dimensional, que objetiva estabelecer condições de semelhança física entre os ensaios considerando-se relações entre as áreas transversais dos amostradores correspondentes a 0,5, 1,5 e 2,0 vezes a área do amostrador padrão. A utilização de um programa numérico desenvolvido por Lobo *et al* (2007) permitiu analisar e quantificar, através de simulações numéricas, a penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$, bem como a energia e a força dinâmica produzida durante a penetração. Através da análise experimental realizada por meio de um programa de ensaios de campo foram executados ensaios com diferentes geometrias, utilizando amostradores de ponta aberta e ponta fechada, com mecanismos de levantamento do martelo que utiliza cabo de aço e corda de sisal, onde demonstrou-se que diferentes equipamentos produzem resistência à penetração similar quando considerados os princípios de escala e similaridade. Porém, observa-se, em todas as verticais ensaiadas, uma dispersão significativa de resultados que podem estar relacionadas à heterogeneidade do solo, eficiências e outros fatores inerentes a ensaios de penetração dinâmica. Apesar da dispersão nos valores de penetração, força e energia, sugere-se que existe grande potencial no uso dos conceitos de similaridade aplicados a ensaios dinâmicos, cuja prática pode contribuir na interpretação dos resultados sem a necessidade de recorrer-se a análises de natureza puramente empíricas.

Palavras-chave: ensaios dinâmicos; efeito de escala; similaridade; tensão de ruptura.

ABSTRACT

DALLA ROSA, S. Study of scale effects in dynamic penetration tests. 2008. M.Sc. Dissertation – Department of Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The Brazilian geotechnical practice is heavily dependent on SPT tests and for this reason it is fundamental the improvements of interpretation method throughout systematic research in this area. Although widely used, the test has been the object of frequent criticism, due to aspects related to scatter in test data, dependence of the operator and diversity of equipment and procedures. Because of these limitations, studies of measured energy have been developed to standardize the test are of ultimate importance and so are the methods of interpretation based on energy. To validate approaches based on the concepts of energy and dynamic, an equipment was constructed and tested following the principles of scale and similarity in an attempt of evaluating the geometrical similarities involved in the dynamic driving process. The equipment has been designed according to a dimensional analysis, which aims to establish conditions of physical similarity between the tests considered to be 0.5, 1.5 and 2.0 times the area of the standard sampler. The use of a numerical program developed by Lobo *et al* (2007) allowed numerical simulations to be carried out in order to predict the sampler penetration $\Delta\rho$, as well as the energy and dynamic force produced during penetration. Through experimental analysis performed, it was possible to test the different geometries, using open and closed samplers, and two different lifting mechanisms for lifting the hammer, using steel wire and sisal rope. Despite the scatter, the various equipments and procedures produce similar when the principles of scale and similarity have been considered. Scatter is attributed to soil heterogeneity, efficiency and other factors inherent to dynamic penetration testing. From the experimental program, it has been concluded that concepts of similarity applied to dynamic tests have great potential in the interpretation of SPT data, which opens up new alternatives to the empirical methods currently adopted in practice.

Key-words: dynamic penetration tests; scale effects; similarity; tension failure.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 INTRODUÇÃO.....	21
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	22
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.3.1 Objetivo Geral.....	22
1.3.2 Objetivos Específicos.....	23
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 INTRODUÇÃO.....	25
2.2 ENSAIOS de penetração dinâmica.....	26
2.2.1 Ensaio SPT.....	26
2.2.2 Ensaio LPT.....	29
2.2.2.1 <i>North American</i> LPT (NALPT).....	29
2.2.2.2 <i>Japanese</i> LPT (JLPT).....	30
2.2.2.3 <i>Italian</i> LPT (ILPT).....	31
2.3 TEORIA DA EQUAÇÃO DA ONDA.....	33
2.3.1 Equação da onda.....	33
2.3.2 Comportamento da extremidade da haste.....	38
2.3.3 Efeito do atrito lateral na haste.....	42
2.3.4 Variação da impedância da haste.....	43
2.4 CONCEITOS DE ENERGIA NO ENSAIO SPT.....	45
2.4.1 Energias contidas no processo de cravação do amostrador no solo.....	47
2.5 COMENTÁRIOS FINAIS.....	59
3 ANÁLISE DIMENSIONAL E DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS.....	61
3.1 INTRODUÇÃO.....	61
3.2 Análise dimensional.....	61
3.2.1 Matriz dimensional.....	62

3.2.2 Mudança de base.....	64
3.2.2.1 Escolha da nova base	64
3.2.2.2 Algoritmo para mudança de base.....	64
3.2.3 Semelhança e efeito de escala.....	67
3.3 ENSAIOS DINÂMICOS EM ESCALA – ENSAIO SPT.....	68
3.3.1 Construção da matriz dimensional.....	68
3.3.2 Mudança de base.....	69
3.4 DIMENSIONAMENTO DOS ENSAIOS DINÂMICOS MODIFICADOS.....	75
3.5 DESENVOLVIMENTO DOS EQUIPAMENTOS.....	79
3.5.1 Equipamentos de penetração dinâmica.....	79
3.6 COMENTÁRIOS FINAIS.....	91
4 ANÁLISE NUMÉRICA.....	92
4.1 INTRODUÇÃO.....	92
4.2 PROGRAMA NUMÉRICO	92
4.3 ANÁLISE NUMÉRICA DOS ENSAIOS DINÂMICOS MODIFICADOS.....	98
4.3.1 Determinação dos parâmetros de entrada	98
4.3.2 Simulação dos ensaios dinâmicos modificados penetrando em ponta aberta (não considerando o embuchamento)	100
4.3.2.1 Ensaio dinâmico idealizado (similaridade completa)	100
4.3.2.2 Experimento (similaridade incompleta).....	104
4.4 COMENTÁRIOS FINAIS.....	111
5 PROGRAMA DE EXPERIMENTOS.....	112
5.1 INTRODUÇÃO	112
5.2 METODOLOGIA	114
5.2.1 Montagem do Equipamento.....	114
5.2.2 Equipamentos.....	115
5.2.3 Solo	121
5.2.4 Ensaio	123
5.2.4.1 Ensaio SPT.....	123

5.2.4.2 Ensaio de caracterização do solo.....	130
5.3 RESULTADOS	134
5.3.1 Ensaio SPT utilizando sistema com cabo de aço	134
5.3.2 Ensaio SPT utilizando sistema com corda de sisal	138
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	140
5.4.1 Penetração em ponta aberta	143
5.4.1.1 Ensaio dinâmico utilizando sistema com cabo de aço.....	143
5.4.1.2 Ensaio dinâmico utilizando sistema com corda de sisal.....	144
5.4.2 Penetração em ponta fechada.....	153
5.4.2.1 Ensaio dinâmico utilizando sistema com cabo de aço.....	153
5.4.2.2 Ensaio dinâmico utilizando sistema com corda de sisal.....	155
5.5 COMENTÁRIOS FINAIS.....	166
6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	167
6.1 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	167
6.2 CONCLUSÕES	168
6.2.1 Quanto ao desenvolvimento dos equipamentos.....	168
6.2.2 Quanto à análise numérica.....	168
6.2.3 Quanto à campanha experimental.....	168
6.2.4 Quanto aos resultados	169
6.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	169
REFERÊNCIAS	171

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Ilustração do Ensaio SPT (Schnaid, 2000).....	27
Figura 2.2: Amostrador-padrão do ensaio SPT (Schnaid, 2000).....	28
Figura 2.3: Amostrador NALPT (Daniel, 2000).	30
Figura 2.4: Amostrador JLPT (Daniel, 2000).	31
Figura 2.5: Amostrador ILPT (Daniel, 2000).....	32
Figura 2.6: Formação da onda longitudinal de tensão (Skov,1982).....	34
Figura 2.7: Representação esquemática da propagação de uma onda de tensão em uma haste (Skov, 1982).	37
Figura 2.8: Comportamento das ondas no instante t (Timoshenko & Goodier,1970).....	38
Figura 2.9: Comportamento das ondas no instante $t+dt$ (Timoshenko & Goodier,1970).....	38
Figura 2.10: Condições de contorno na ponta da haste (Skov, 1982).	39
Figura 2.11: Reflexão das ondas de força e velocidade na ponta da haste (Skov, 1982).....	40
Figura 2.12: Ondas geradas num ponto intermediário da haste (Gonçalves <i>et al</i> , 2000).....	42
Figura 2.13: Propagação da onda de tensão de descontinuidade (Skov, 1982).....	43
Figura 2.14: Estágios de cravação do amostrador no solo (Odebrecht, 2003).	46
Figura 2.15: Sinal típico de uma haste longa: 35,80 m (Odebrecht <i>et al</i> , 2004).	53
Figura 2.16: Energia versus penetração (Odebrecht, 2003).	55
Figura 2.17: Eficiência η_I em função do comprimento da haste (Odebrecht, 2003).....	57
Figura 2.18: Energia versus Penetração (Odebrecht, 2003).	58
Figura 3.1: Martelo de 23 kg e seus respectivos componentes (medidas em mm).	80
Figura 3.2: Martelo de 65 kg e seus respectivos componentes (medidas em mm).	81
Figura 3.3: Martelo de 120 kg e seus respectivos componentes (medidas em mm).	81
Figura 3.4: Martelo de 23 kg.	82
Figura 3.5: Martelo de 65 kg.	82
Figura 3.6: Martelo de 120 kg.	83
Figura 3.7: Cabeça de bater utilizada para os ensaios com o martelo de 23 kg e 120 kg, respectivamente.	83
Figura 3.8: Hastes dos ensaios 0,5 SPT e 2,0 SPT.	85
Figura 3.9: Hastes usinadas.	86
Figura 3.10: Amostradores utilizados nos ensaios dinâmicos modificados.	87
Figura 3.11: Cabeça, corpo e sapata cortante dos amostradores.	88
Figura 3.12: Sapatas cortantes com ponta aberta.	89
Figura 3.13: Sapatas cortantes com ponta fechada.....	90
Figura 4.1: Discretização do sistema martelo-haste-amostrador (Lobo, 2007).....	97
Figura 4.2: Perfil de sondagem típico de solo granular (areia de Osório – RS) utilizada na simulação numérica.	99
Figura 4.3: Resultados registrados na simulação numérica do ensaio 2,0 SPT executado na profundidade de 17 m.	104
Figura 4.4: Energia absorvida pelo solo.	107
Figura 4.5: Penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$	108
Figura 4.6: Força dinâmica F_d	108
Figura 4.7: Tensão de ruptura.....	109
Figura 5.1: Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.	113
Figura 5.2: Local da realização dos ensaios.	113
Figura 5.3: Equipamento SPT montado.	114
Figura 5.4: Marcação com giz, utilizada na determinação da penetração permanente de cada golpe.	115

Figura 5.5: Composição do ensaio 0,5 SPT.	116
Figura 5.6: Composição do ensaio 1,0 SPT.	117
Figura 5.7: Composição do ensaio 1,5 SPT.	117
Figura 5.8: Composição do ensaio 2,0 SPT.	118
Figura 5.9: Locação dos furos de sondagem.	119
Figura 5.10: Mapa do estado de Santa Catarina.	121
Figura 5.11: Mapa Geotécnico de Joinville (França, 2002 apud Pereira et al, 2004).	123
Figura 5.12: Equipamento utilizado na execução da sondagem.....	124
Figura 5.13: Bica de lavagem.	124
Figura 5.14: Processo de cravação do amostrador-padrão.	125
Figura 5.15: Registro, com o com o auxílio de giz e de uma fita métrica, da penetração permanente de cada golpe.....	126
Figura 5.16: Amostrador-padrão com amostra de solo.	126
Figura 5.17: Perfil de sondagem.....	128
Figura 5.18: Execução do ensaio 0,5 SPT.	129
Figura 5.19: Execução do ensaio 2,0 SPT.	130
Figura 5.20: Teor de umidade das amostras de solo e limites de liquidez e plasticidade.	132
Figura 5.21: Curva granulométrica obtida através do ensaio de peneiramento e sedimentação para o furo de sondagem 03.....	133
Figura 5.22: Curva granulométrica obtida através do ensaio de peneiramento e sedimentação para o furo de sondagem 04.....	134
Figura 5.23: Energia absorvida pelo solo (ensaios penetrando em ponta aberta).	147
Figura 5.24: Penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$ (ensaios penetrando em ponta aberta). ..	148
Figura 5.25: Força dinâmica F_d (ensaios penetrando em ponta aberta).	149
Figura 5.26: Tensão de ruptura (ensaios penetrando em ponta aberta).	150
Figura 5.27: Energia absorvida pelo solo (ensaios penetrando em ponta fechada).....	158
Figura 5.28: Penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$ (ensaios penetrando em ponta fechada). 159	
Figura 5.29: Força dinâmica F_d (ensaios penetrando em ponta fechada).	160
Figura 5.30: Tensão de ruptura (ensaios penetrando em ponta fechada).	161
Figura 5.31: Penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$	164
Figura 5.32: Energia absorvida pelo solo.	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Detalhes do ensaio SPT e LPT.	32
Tabela 2.2: Ondas refletidas pela descontinuidade da haste.	45
Tabela 2.3: Relação de energia $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ para o caso de furo de sondagem seco.	49
Tabela 2.4: Relação de energia $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ para o caso de furo de sondagem completamente inundado.	50
Tabela 3.1: Grandezas Fundamentais no Sistema – SI.	62
Tabela 3.2: Matriz dimensional.	65
Tabela 3.3: Matriz Dimensional para os ensaios SPT.	68
Tabela 3.4: Matriz Dimensional para os ensaios SPT com as novas grandezas de base.	69
Tabela 3.5: Matriz Dimensional para os ensaios SPT com a nova base.	70
Tabela 3.6: Matriz dimensional das unidades envolvidas nos ensaios SPT.	71
Tabela 3.7: Fatores de escala da análise dimensional para o ensaio 2,0 SPT.	72
Tabela 3.8: Fatores de escala da análise dimensional para o ensaio 1,5 SPT.	73
Tabela 3.9: Fatores de escala da análise dimensional para o ensaio 0,5 SPT.	74
Tabela 3.10: Dimensionamento dos ensaios dinâmicos.	75
Tabela 3.11: Dimensionamento do martelo.	76
Tabela 3.12: Dimensionamento das hastes.	76
Tabela 3.13: Dimensionamento das hastes com novo diâmetro.	77
Tabela 3.14: Comprimento total do sistema haste com novo diâmetro mais amostrador.	78
Tabela 3.15: Configuração do ensaio SPT e dos ensaios SPT modificados.	78
Tabela 3.16: Dimensionamento dos ensaios dinâmicos modificados.	79
Tabela 3.17: Martelos de 23 kg, 65 kg e 120 kg e seus componentes.	80
Tabela 3.18: Dimensões das hastes utilizadas nos ensaios SPT.	84
Tabela 3.19: Configuração final dos ensaios dinâmicos modificados.	91
Tabela 4.1: Parâmetros de entrada referentes ao solo.	100
Tabela 4.2: Dimensões básicas dos ensaios dinâmicos idealizados.	101
Tabela 4.3: Valores de aceleração da gravidade em escala.	101
Tabela 4.4: Resultado da simulação numérica dos ensaios dinâmicos modificados idealizados.	102
Tabela 4.5: Dimensões básicas dos ensaios dinâmicos executados no experimento.	105
Tabela 4.6: Resultado da simulação numérica dos ensaios dinâmicos executados no experimento.	106
Tabela 5.1: Caracterização dos furos de sondagem.	120
Tabela 5.2: Análise tátil-visual do solo.	127
Tabela 5.3: Ensaio de caracterização nos furos de sondagem.	130
Tabela 5.4: Propriedades físicas do solo.	133
Tabela 5.5: Profundidade de cravação do amostrador no solo.	135
Tabela 5.6: Valores de penetração do ensaio 0,5 SPT com cabo de aço.	136
Tabela 5.7: Valores de penetração do ensaio 1,0 SPT com cabo de aço.	137
Tabela 5.8: Valores de penetração do ensaio 2,0 SPT com cabo de aço.	138
Tabela 5.9: Valores de penetração do ensaio 0,5 SPT com corda de sisal.	139
Tabela 5.10: Valores de penetração do ensaio 1,0 SPT com corda de sisal.	140
Tabela 5.11: Resultados experimentais dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta aberta, utilizando o sistema de elevação com cabo de aço.	143
Tabela 5.12: Resultados previstos dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta aberta, utilizando o sistema de elevação com cabo de aço.	144

Tabela 5.13: Resultados experimentais dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta aberta, utilizando o sistema de elevação com corda de sisal.....	145
Tabela 5.14: Resultados previstos dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta aberta, utilizando o sistema de elevação com corda de sisal.....	146
Tabela 5.15: Resultados experimentais dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com cabo de aço.....	154
Tabela 5.16: Resultados previstos nos ensaios dinâmicos penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com cabo de aço.....	155
Tabela 5.17: Resultados experimentais dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com corda de sisal.....	156
Tabela 5.18: Resultados previstos nos ensaios dinâmicos penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com corda de sisal.....	157
Tabela 5.19: Relação entre a energia absorvida pelo solo no sistema de elevação do martelo que utiliza corda de sisal e o sistema que utiliza cabo de aço.	166

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ε : Deformação;

ϕ : Diâmetro;

ϕ' : Ângulo de atrito interno efetivo do solo;

G : Módulo de corte;

ℓ : Comprimento da haste;

η_1 : Eficiência devido ao golpe do martelo;

η_2 : Eficiência devido ao comprimento da haste;

η_3 : Eficiência do ensaio SPT devido ao sistema;

γ : Peso específico;

ρ : Massa específica;

ν : Coeficiente de carregamento dinâmico;

σ : Tensão;

σ'_v : Tensão vertical efetiva;

σ_{rup} : tensão de ruptura do solo;

ξ : Energia;

δ : Variação;

ν : Coeficiente de Poisson;

Δx : Distância por onde está passando a onda de tensão;

Δu : Deslocamento de uma partícula devido a passagem da onda;

Δt : Intervalo de tempo;

$\Delta \rho$: Penetração permanente do amostrador no solo;

A : Área da seção transversal da haste;

AH : Seção transversal do martelo;

AR : Seção transversal das hastes;

c : Velocidade de propagação da onda;

e : Taxa de restituição do golpe;

E_a : Módulo de elasticidade do aço;

EPG_m : Energia potencial gravitacional do martelo;

EPG_h : Energia potencial gravitacional da haste;

E^* : Energia potencial gravitacional teórica, segundo NBR 6484;

$\Delta EPG_{m+h}^{sistema}$: Energia potencial gravitacional do sistema (massa + haste);

F : Força;

F_d : Força dinâmica;

g ou G : Aceleração da gravidade;

G_a : Massa específica do aço;

G_o : Módulo cisalhante a pequenas deformações;

h ou H : Altura de queda do martelo;

h : Comprimento de haste superior ao nível do terreno;

I : Impulso;

ILPT: Italian LPT;

JLPT: Japanese LPT;

L : Comprimento;

LH : Comprimento do martelo;

LR : Comprimento das hastes;

LS : Comprimento do mostrador;

LPT: Large Penetration Test;

M_h : Massa da haste;

M_m : Massa do martelo;

m : Massa da haste;

NA: Nível do lençol freático

nH : Número de nós de discretização do martelo

nR : Número de nós de discretização das hastes

n_S : Número de nós de discretização do amostrador

N : Medida de resistência dinâmica;

NBR: Norma Brasileira;

N_{spt} : Número de golpes necessários à penetração dos 30 cm finais do amostrador SPT;

NALPT: North American LPT;

p'_o : tensão média octaédrica do solo;

Q : *Quake*;

r_{emb} : penetração máxima interna de solo;

R_p : Resistência na ponta da haste;

R_u : resistência à cravação;

$sp.De$: Diâmetro externo do amostrador;

$sp.Di$: Diâmetros interno do amostrador;

$sp.ri$: Penetração inicial;

SPT: Standard Penetration Test;

S_u : resistência ao cisalhamento não drenada;

T : Energia cinética;

TT : Tempo de integração;

t : Tempo;

U : Perímetro da estaca;

u : Deslocamento;

V : Velocidade da partícula animada durante a passagem da onda;

V_p : Velocidade de ponta da haste;

V : Energia Potencial;

X : Coeficiente de amortecimento;

Z : Impedância;

Z_h : Impedância da haste;

ZtH : Relação de amortecimento do martelo;

ZtR : Relação de amortecimento da composição de hastes;

W : Atrito;

W : Peso próprio da estaca;

W_s : Trabalho efetuado por forças não conservativas na ponta do amostrador;

W_{nc} : Trabalho efetuado por forças não conservativas (perdas diversas);

$F \uparrow$: força de compressão no sentido ascendente;

$F \downarrow$: força de compressão no sentido descendente;

$V \uparrow$: velocidade da partícula no sentido ascendente;

$V \downarrow$: velocidade da partícula no sentido descendente.

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Um elemento de fundação tem por finalidade transferir as cargas da estrutura para o solo, distribuindo-as de maneira satisfatória sobre a superfície de contato com o solo no qual se apóia. Por este motivo, escolher a fundação mais adequada, conhecer os esforços atuantes sobre a edificação e as características do solo são condicionantes essenciais a um projeto seguro e econômico.

Para cumprir com esta finalidade, utiliza-se no Brasil o *Standart Penetration Test* – SPT, reconhecidamente a mais popular, rotineira e econômica ferramenta de investigação utilizada na engenharia geotécnica e na engenharia de fundações. Sua popularidade decorre da simplicidade operacional, baixo custo e experiência empírica acumulada na execução e na aplicação dos resultados, que tornam o SPT uma ferramenta indispensável à prática de engenharia.

Embora bastante utilizado, o ensaio tem sido objeto freqüente de críticas da comunidade acadêmica, abrangendo tanto aspectos relacionados à dispersão de resultados, quanto à dependência do operador e diversidade de equipamentos e procedimentos. Devido a estas limitações, desde a década de 70, estudos de medição de energia têm sido desenvolvidos visando a padronização do ensaio, sendo inúmeras as contribuições nesta área. Estes estudos procuraram identificar a influência na medida de penetração N_{SPT} – número de golpes necessários para fazer o amostrador penetrar 300 mm, após uma cravação inicial de 150 mm – de fatores associados às divergências encontradas nas especificações geométricas dos componentes mecânicos utilizados nos ensaios, e também nos sistemas de elevação e liberação do martelo. Estas divergências implicam em distintas energias transferidas às hastes e conseqüentemente utilizadas na cravação do amostrador, levando a resultados distintos e conseqüente dispersão nas medidas.

Face à esta nova abordagem, a aplicação de conceitos de energia na interpretação de ensaios SPT vem abrindo uma gama de soluções práticas à engenharia de fundações. A presente pesquisa tem como objetivo contribuir no entendimento dos mecanismos de mobilização de resistência no amostrador SPT e de compreender a ação do efeito de escala na transposição das resistências mobilizadas pelo amostrador, a fim de buscar respostas para outras formas de aplicabilidade de conceitos de energia no processo de cravação do amostrador SPT. Busca-se explorar os conceitos de energia aplicados à cravação do amostrador SPT através de análises comparativas entre ensaios SPT e ensaios onde os componentes são modificados com dimensões em diferentes escalas, projetados em condições de similaridade.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A engenharia geotécnica brasileira é fortemente dependente dos resultados do ensaio SPT, sendo assim é de fundamental importância aprimorar os métodos de investigação e elaboração de projetos nesta área. Sabendo que o ensaio SPT é a ferramenta mais utilizada pela engenharia geotécnica, o fato de projetar e construir equipamentos de penetração dentro dos princípios de escala e similaridade, torna possível avaliar as semelhanças e/ou diferenças entre o ensaio SPT e ensaios realizados com equipamentos de sondagem modificados com dimensões em diferentes escalas.

Nesta pesquisa busca-se verificar numericamente e experimentalmente as semelhanças geométricas envolvidas no processo de cravação dinâmico, avaliar a penetração do amostrador no solo e sua respectiva tensão de ruptura e, portanto, incorporar novos conhecimentos à interpretação do ensaio SPT por meio de um método racional de análise baseado nos conceitos de energia.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos geral e específicos atribuídos à presente pesquisa podem ser resumidos como:

1.3.1 Objetivo Geral

Verificar numérica e experimentalmente os efeitos de escala contidos no ensaio SPT através da cravação dinâmica do amostrador padrão e amostradores modificados com dimensões em diferentes escalas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Projetar e construir equipamentos de penetração dentro dos princípios de escala e similaridade.
- Verificar numericamente as semelhanças geométricas envolvidas no processo de cravação dinâmico.
- Realizar ensaios dinâmicos com diferentes dimensões, incluindo o SPT e outros ensaios dinâmicos não padronizados, construídos em escalas distintas, e os componentes do referido ensaio modificados.
- Executar um programa experimental que demonstre que diferentes equipamentos produzem a mesma resistência do solo à penetração do amostrador, independentemente da escala, sem interveniência de fatores empíricos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em seis Capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre o tema abordado, a justificativa e os objetivos da pesquisa. No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão sobre os ensaios de penetração dinâmica SPT – *Standard Penetration Test* e LPT – *Large Penetration Test*, no que diz respeito aos equipamentos utilizados e execução, conceitos de propagação de ondas em barras e a nova interpretação do ensaio SPT, estabelecida em termos de energia.

No Capítulo 3 são apresentados um breve conceito de análise dimensional e o desenvolvimento dos equipamentos em diferentes escalas, utilizados na realização dos ensaios de penetração dinâmica. São apresentadas as análises realizadas para cada configuração de ensaio e o projeto dos equipamentos.

O Capítulo 4 apresenta a simulação numérica dos ensaios dinâmicos projetados em diferentes escalas e estudados na presente pesquisa. O capítulo apresenta uma breve descrição do programa e a análise numérica dos ensaios simulados.

A campanha de ensaios de campo projetada com base no uso de quatro ensaios dinâmicos modificados, dimensionados e descritos no Capítulo 3 deste trabalho, é apresentada e discutida no Capítulo 5, juntamente com a análise dos resultados.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

O *Standard Penetration Test* – SPT é reconhecidamente o sistema de sondagem mais utilizado no Brasil e no mundo. Este ensaio difundiu-se por ser um sistema com características simples, de baixo custo e também devido à experiência empírica acumulada na execução e na aplicação dos resultados obtidos. Apesar das vantagens anteriormente mencionadas este ensaio tem recebido diversas críticas relacionadas à sua padronização. Medições de energia aliadas aos conceitos de dinâmica, vem sendo aplicadas ao ensaio SPT visando uma interpretação racional e a uniformidade de resultados. Inúmeras publicações recentes buscam entender o modo de transferência de energia e quantificar suas variações, estimando uma força dinâmica de reação do solo à cravação do amostrador SPT (*e.g.* Odebrecht, 2003; Odebrecht *et al*, 2004; Aoki & Cintra, 2000; Aoki & Cintra, 2004).

O ensaio SPT é utilizado primeiramente para caracterizar estratigraficamente o solo através de uma amostragem direta. A seguir, utiliza-se o ensaio como uma medida indireta de resistência, medindo-se o número de golpes necessários à cravação do amostrador. Porém, segundo Daniel (2000), o ensaio é considerado insatisfatório para depósitos de pedregulho, primeiramente porque partículas deste material podem ser maiores que a abertura do amostrador SPT e também porque, normalmente, métodos de cravação empregados para o SPT em areias são, muitas vezes, impraticáveis em pedregulhos. Devido a isso, ferramentas como o LPT – *Large Penetration Test* têm sido utilizadas para caracterização de solos pedregulhosos.

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão sobre os ensaios de penetração dinâmica SPT e LPT, no que diz respeito aos equipamentos utilizados e execução, conceitos de propagação de ondas em barras, conceitos de energia referentes ao mecanismo de

transferência de energia no ensaio SPT e sua aplicação na determinação da força dinâmica de cravação do amostrador SPT propostas por Odebrecht (2003).

2.2 ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DINÂMICA

Os ensaios de penetração dinâmica são ferramentas geotécnicas utilizadas, principalmente, com o objetivo de identificar e caracterizar o solo através de uma amostragem direta do material, e na medida de resistência dinâmica “N” oferecida pelo solo à cravação do amostrador, medida útil na estimativa de parâmetros de projeto de fundações.

2.2.1 Ensaio SPT

O ensaio de SPT - *Standard Penetration Test* constitui-se em uma medida simples de resistência mecânica conjugada a uma sondagem de simples reconhecimento. A perfuração é realizada por meio de um trado e circulação de água utilizando-se um trépano de lavagem como ferramenta de escavação. Amostras representativas de solo são coletadas a cada metro de profundidade por meio do amostrador-padrão.

O procedimento de ensaio consiste na cravação do amostrador no fundo de uma escavação, revestida ou não, usando um peso de 65 kg, caindo de uma altura de 750 mm. O valor N_{SPT} é o número de golpes necessário para fazer o amostrador penetrar 300 mm, após uma cravação inicial de 150 mm. A Figura 2.1 ilustra o ensaio SPT.

O amostrador é composto por uma sapata cortante, corpo e cabeça. O corpo do amostrador deve ser confeccionado com aço duro e a superfície, tanto interna como a externa, devem ser lisas. O diâmetro externo do amostrador deve possuir uma dimensão de 50,8 mm (± 2 mm) e o diâmetro interno 34,9 mm (± 2 mm). Seu comprimento deverá ter no mínimo 457 mm.

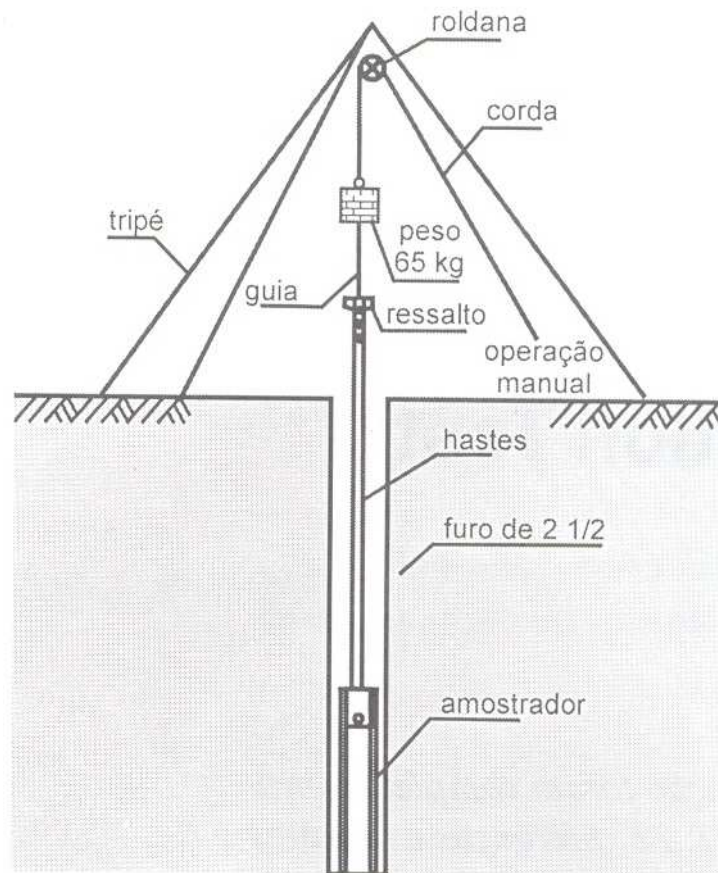
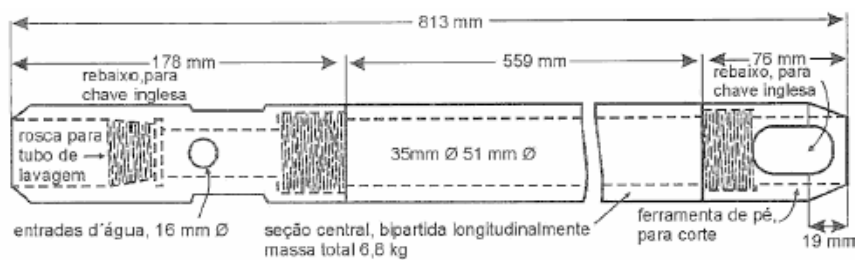


Figura 2.1: Ilustração do Ensaio SPT (Schnaid, 2000).

A sapata cortante, parte inferior do amostrador, deve ter um comprimento de 76 mm (± 1 mm), ter os mesmos diâmetros interno e externo do corpo do amostrador, possuir um chanfro nos últimos 19 mm e ser confeccionada com o mesmo material do corpo do amostrador.

A parte superior do amostrador deve permitir o perfeito acoplamento com as hastes, possuir uma válvula, normalmente com o uso de uma esfera de aço, que evite o retorno de ar ou água para dentro do corpo do amostrador e orifícios laterais, com dimensões que permitam a fácil saída de ar e água que se encontram no interior do mesmo. Na Figura 2.2 pode-se visualizar o amostrador-padrão.



(a) seção esquemática.



(b) foto do amostrador bipartido.

Figura 2.2: Amostrador-padrão do ensaio SPT (Schnaid, 2000).

As hastes deverão ser unidas por juntas rosqueáveis e devem permitir perfeita ligação com amostrador. O peso da haste, segundo a NBR 6484/2001 – Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, é de 323 kN/m^2 ($3,23 \text{ kgf/cm}^2$).

O conjunto do martelo, de acordo com a NBR 6484/2001, deve ser composto por uma cabeça de bater de aço atarraxada na parte superior da haste, um martelo de aço com 65 kg, e um sistema de liberação que garanta a sua queda livre de uma altura de 750 mm. O sistema de guia do martelo deve minimizar o atrito. O peso total do conjunto, cabeça de bater, martelo, guia e sistema de liberação não deve exceder 115 kg. Exige ainda um coxim de madeira dura na parte inferior do martelo que deve ser periodicamente substituído. Com relação a cabeça de bater a norma impõe as dimensões de 83 mm de diâmetro e 90 mm de altura.

A execução de sondagem de simples reconhecimento do solo tem seu método de ensaio normalizado pela NBR 6484/2001, a qual prescreve o método de execução de sondagem de simples reconhecimento do subsolo e medidas do índice de resistência à penetração, para fins da Engenharia Civil, cujas finalidades são: a determinação dos tipos de solo em suas respectivas profundidades de ocorrência, a posição do nível d'água e os índices de resistência à penetração a cada metro.

Recentemente, este ensaio foi objeto de estudo no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGE/UFRGS

(Odebrecht, 2003), já tendo sido detalhado por Schnaid (2000). Portanto, o equipamento e o procedimento de ensaio não serão descritos detalhadamente nesta dissertação.

2.2.2 Ensaio LPT

O termo LPT – *Large Penetration Test* tem sido utilizado por diversos autores para descrever combinações de amostradores e martelos com maiores dimensões em relação ao ensaio SPT, tendo como objetivo utilizá-los em pedregulho. Pesquisas têm sido realizadas visando correlacionar resultados de ensaios SPT e LPT através de abordagens empíricas baseadas em dados experimentais. A seguir serão apresentados três tipos de ensaios LPT identificados pela área de origem e descritos em publicações técnicas.

2.2.2.1 North American LPT (NALPT)

O amostrador do LPT Norte Americano possui um incremento de 12,7 mm em relação aos 50,8 mm do amostrador SPT. Estes amostradores são comumente utilizados em solos pedregulhosos e também em investigações ambientais para aumentar o volume da amostra (*e.g.* Daniel, 2000; Kulhawy e Chen, 2005). Na Figura 2.3 apresenta-se uma ilustração com as dimensões do amostrador NALPT.

Daniel (2000) descreve uma investigação ambiental e geotécnica para caracterização de depósitos de pedregulho no Alaska, através de um LPT composto por um martelo de 1335 N, cravado com altura de queda de 0,76 m, o amostrador possui 861 mm de comprimento e diâmetro externo de 76,2 mm e interno de 61 mm.

A contagem de golpes tanto do ensaio SPT quanto do NALPT foram corrigidas para 60% da energia teórica do martelo (Daniel *et al*, 2003).

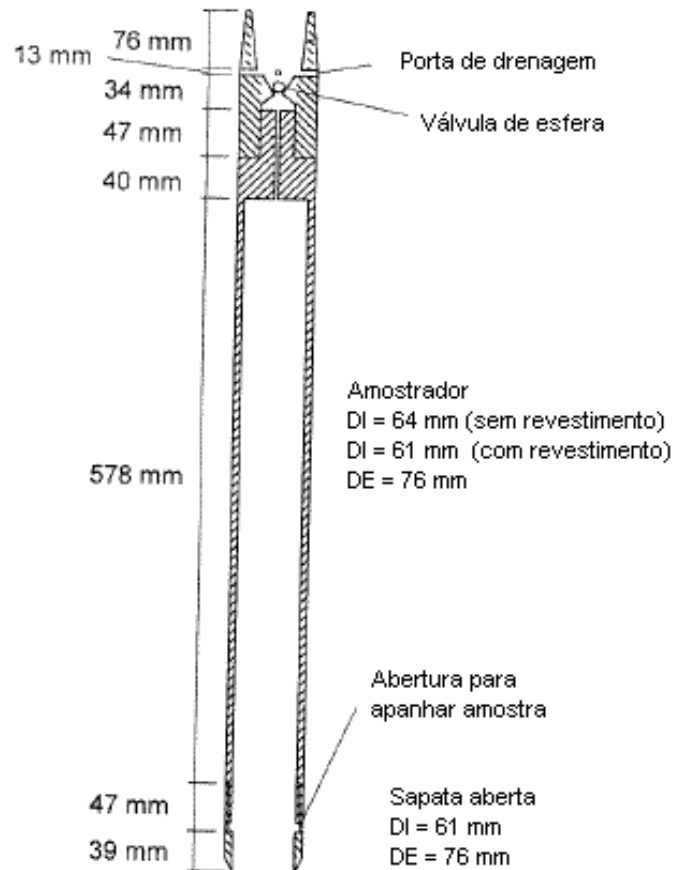


Figura 2.3: Amostrador NALPT (Daniel, 2000).

2.2.2.2 Japanese LPT (JLPT)

O LPT Japonês proposto por Kaito *et al* (1971) *apud* Daniel *et al* (2000), utilizado na caracterização geotécnica de depósitos de pedregulho, é composto por um martelo com de 981 N liberado de uma altura de 1,50 m. O amostrador tem diâmetro externo de 73 mm e interno de 50 mm e possui 850 mm de comprimento, como pode ser observado na Figura 2.4.

Posteriormente, Yoshida *et al* (1988) *apud* Daniel *et al* (2003) correlacionou ensaio SPT e JLPT através de ensaios realizados em câmara da calibração com areia saturada e pedregulho. O tamanho médio dos grãos dos materiais testados era de 1,13 e 2,28 milímetros. A energia da penetração não foi monitorada.

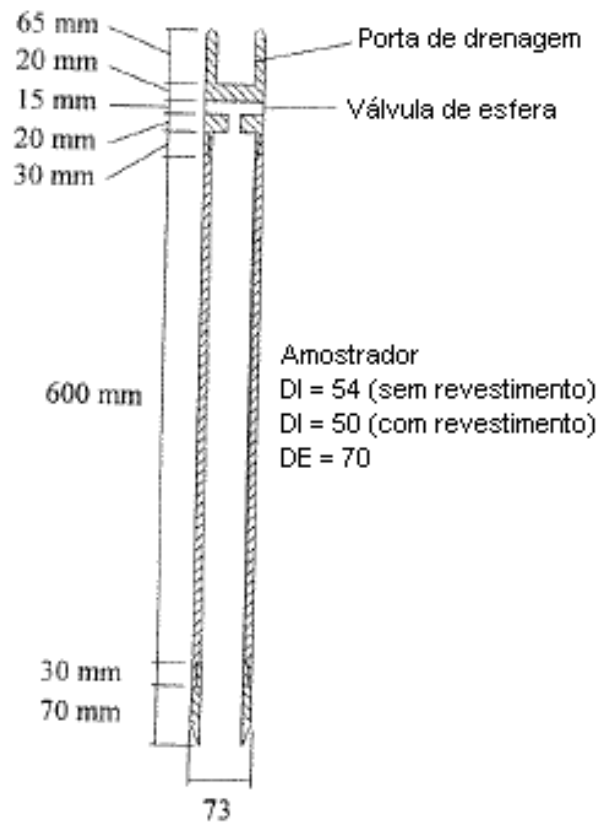


Figura 2.4: Amostrador JLPT (Daniel, 2000).

2.2.2.3 Italian LPT (ILPT)

Crova *et al* (1993) *apud* Daniel *et al* (2000), descrevem o LPT Italiano como sendo composto por um martelo de 5592 N liberado a uma altura de 0,50 m. Já o amostrador tem 140 mm de diâmetro externo e 100 mm de diâmetro interno e comprimento total de 1157,5 mm. O ILPT pode ser visualizado na Figura 2.5.

O amostrador foi testado em areias e pedregulhos onde o tamanho médio dos grãos variou entre 0,5 a 44 milímetros. A contagem de golpes do ensaio SPT e do ILPT foram corrigidas a 60% da energia teórica do martelo.

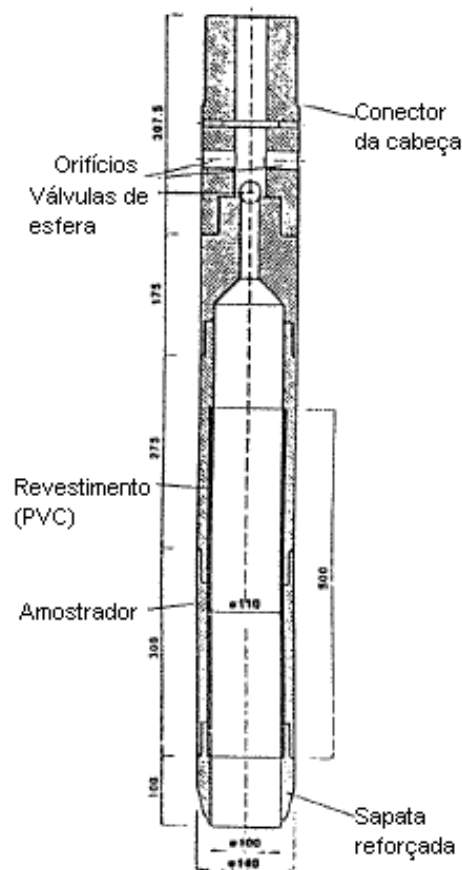


Figura 2.5: Amostrador ILPT (Daniel, 2000).

As propriedades geométricas dos ensaios LPT e SPT apresentados anteriormente são descritas na Tabela 2.1, onde pode-se observar cada um dos diferentes componentes de cada configuração de ensaio.

Tabela 2.1: Detalhes do ensaio SPT e LPT.

Detalhes	SPT ^a	NALPT ^b	JLPT ^c	ILPT ^d
Massa do Martelo (kg)	65,0	133,5	98,1	559,2
Altura de queda do martelo (m)	0,75	0,76	1,50	0,50
Comprimento do amostrador (m)	0,813	0,861	0,850	1,157
Diâmetro interno do amostrador (m)	0,0508	0,0762	0,0730	0,1400
Diâmetro externo do amostrador (m)	0,0349	0,0610	0,0500	0,1000

Nota:

a Norma Brasileira NBR 6484/2001.

b Daniel (2000).

c Kaito *et al* (1971) *apud* Daniel *et al* (2000); Yoshida *et al* (1988) *apud* Daniel *et al* (2003).

d Crova *et al* (1993) *apud* Daniel *et al* (2000).

2.3 TEORIA DA EQUAÇÃO DA ONDA

A análise da cravação como um fenômeno de propagação de ondas de tensão em barras, permite distinguir as componentes estática e dinâmica da resistência oferecida pelo solo, examinar os efeitos do martelo e dos acessórios de cravação, prever a distribuição das tensões em estacas, tanto de compressão quanto de tração, além de ser útil na determinação da capacidade de carga de elementos cravados no solo. Esta teoria também pode ser utilizada como método de análise de dados de cravação, em geral através do monitoramento com instrumentos eletrônicos.

A seguir são apresentados os princípios do fenômeno de propagação de onda em barras. O termo barra será denominado de haste, por ser objeto de estudo da presente pesquisa, mas os conceitos apresentados poderão ser utilizados também para estacas, já que a formulação se aplica em ambos os casos.

2.3.1 Equação da onda

O fenômeno que ocorre quando um martelo com uma massa M_m que cai de uma altura h e aplica um golpe (energia) em uma das extremidades de uma haste com módulo E e área transversal A é ilustrado na Figura 2.6. Na descrição deste fenômeno adota-se algumas hipóteses simplificadoras:

- a) a seção transversal da haste permanece plana durante a passagem da onda longitudinal de tensão;
- b) a tensão se distribui uniformemente sobre toda a seção transversal;
- c) o comprimento da onda longitudinal de tensão é grande comparado com o diâmetro da haste;
- d) os movimentos transversais das partículas são desprezíveis;
- e) as perdas de energia na propagação da onda longitudinal de tensão na haste são desprezíveis;
- f) a velocidade de onda c é função das propriedades do material da haste, assim pode-se dizer que a velocidade de onda é a velocidade com que as zonas de

compressão ou tração se movem ao longo da haste e a velocidade da partícula é a velocidade com que as partículas se movem quando a onda se propaga;

g) as hastes são constituídas por material elástico linear.

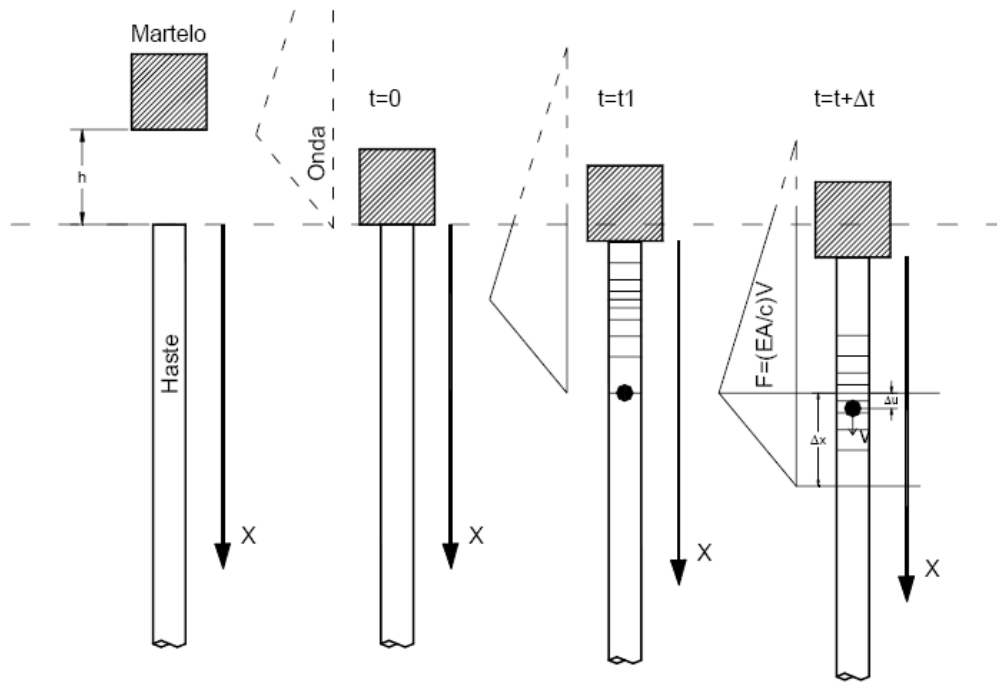


Figura 2.6: Formação da onda longitudinal de tensão (Skov,1982).

Observando a Figura 2.6 percebe-se que, devido a compressão da haste, a partícula sofre uma movimentação de uma distância Δu . A partir da lei de Hooke tem-se:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (2.2)$$

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta u}{\Delta t} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2.3)$$

Como:

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.4)$$

$$V = \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (2.5)$$

Substituindo as equações (2.4) e (2.5) em (2.3), tem-se:

$$F = \frac{EA}{c} V \quad (2.6)$$

onde: c = velocidade de propagação da onda;

V = velocidade da partícula animada durante a passagem da onda;

A = área da seção transversal da haste;

ε = deformação.

sendo: E = módulo de elasticidade do aço ($E = 210 \text{ GPa}$);

F = força;

Δx = distância por onde está passando a onda de tensão;

Δu = deslocamento de uma partícula devido a passagem da onda;

Δt = intervalo de tempo.

Observa-se que há uma proporcionalidade entre força e velocidade quando uma onda de tensão se propaga na direção da haste. Este fator de proporcionalidade entre F e V é denominado de impedância e representado pela letra Z_h , ou seja, a haste impõe uma resistência à mudança de velocidade das partículas que pode ser representada da seguinte forma:

$$Z_h = \frac{EA}{c} \quad (2.7)$$

Na mesma seção Δx , a Lei de Newton também pode ser utilizada:

$$F = ma_c \quad (2.8)$$

onde: m = massa da haste = $\rho A \Delta x$;

ρ = massa específica da haste, que corresponde à relação entre o peso específico do material da haste e a aceleração da gravidade ($\rho = \gamma/g$).

sendo:

$$a_c = \frac{V}{\Delta t} \quad (2.9)$$

Desta forma tem-se:

$$F = \rho A \Delta x \frac{V}{\Delta t} \quad (2.10)$$

Reescrevendo a equação (2.10):

$$F = \rho A \frac{\Delta x}{\Delta t} V = \rho A c V \quad (2.11)$$

Igualando-se (2.6) e (2.11) e simplificando-se, tem-se:

$$\frac{EA}{c} V = \rho A c V \Rightarrow c^2 = \frac{E}{\rho} \quad (2.12)$$

Considerando as condições até aqui estabelecidas, obtém-se uma solução geral da equação da onda através do equilíbrio dinâmico de um segmento de haste em qualquer instante, conforme observado na Figura 2.7 e descrito a seguir.

Utilizando a lei de Newton ($F = ma_c$) e a de Hooke ($F = EA\Delta u/l$) a equação da onda de tensão pode ser derivada. Como:

$$F_1 = F_2 + ma_c \quad (2.13)$$

Tem-se:

$$EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \right) - EA \frac{\partial u}{\partial x} - \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (2.14)$$

Rearranjando a equação (2.14), obtêm-se:

$$EA \frac{\partial u}{\partial x} - EA \frac{\partial u}{\partial x} + EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (2.15)$$

Como $c^2 = \frac{E}{\rho}$, tem-se a equação básica da onda (equação 2.16), que é a equação geral que descreve a propagação longitudinal de tensão ou equação do movimento no interior da haste, na condição particular onde é desprezado o atrito lateral ao longo da haste.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.16)$$

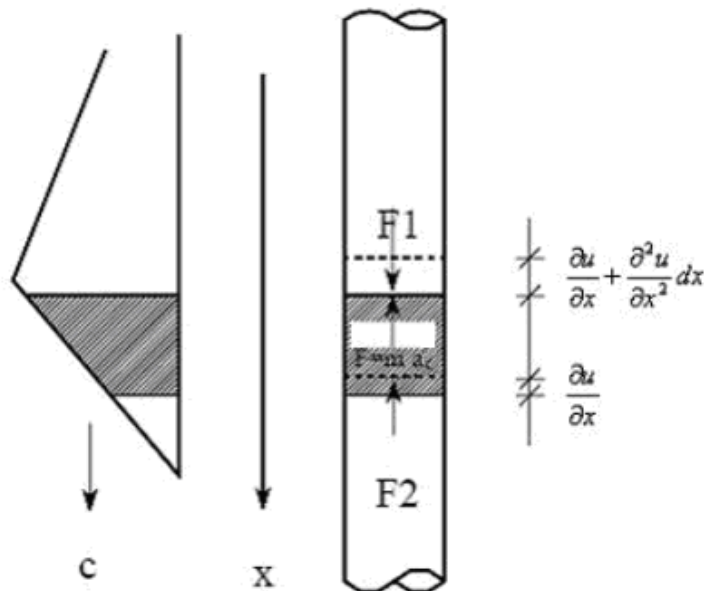


Figura 2.7: Representação esquemática da propagação de uma onda de tensão em uma haste (Skov, 1982).

A solução geral da equação (2.16), que é uma equação diferencial parcial de 2ª ordem, a qual representa o deslocamento u de uma partícula, situada a uma distância x da haste depois de decorrido um tempo t da aplicação do golpe do martelo, é dada pela seguinte equação:

$$u(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (2.17)$$

As duas funções f e g arbitradas, correspondem a duas ondas se propagando com a mesma velocidade c , mas em direções contrárias, como pode ser observado nas Figuras 2.8 e 2.9.

No tempo t , tem-se:

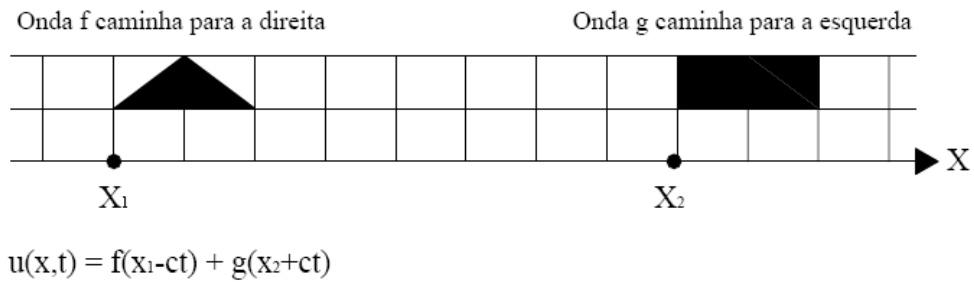


Figura 2.8: Comportamento das ondas no instante t (Timoshenko & Goodier,1970).

No tempo $t+dt$:

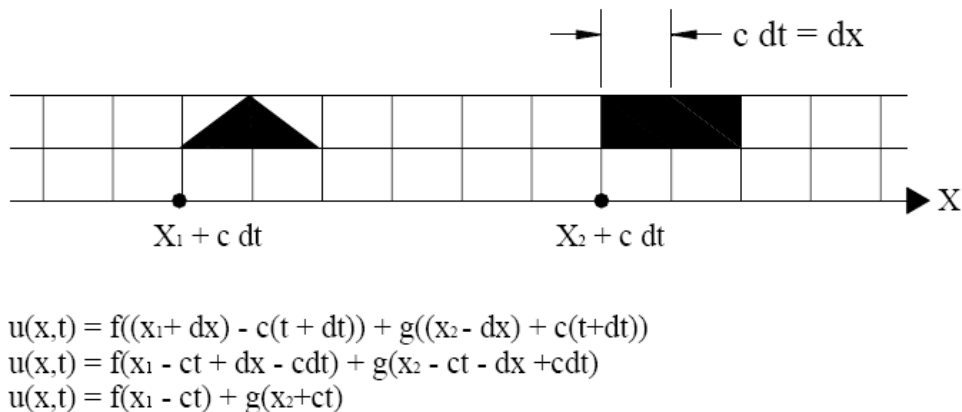


Figura 2.9: Comportamento das ondas no instante $t+dt$ (Timoshenko & Goodier,1970).

Percebe-se que as ondas f e g se deslocam em direções opostas no tempo e não ocorre mudança em sua forma. Devido a isso, diversos autores como Beringen *et al* (1980) e Skov (1982), para simplificar e facilitar a compreensão e o estudo da propagação destas ondas, sugeriram utilizar flechas conforme o sentido de propagação das mesmas (ascendente ou descendente) de acordo com um determinado referencial. Assim, a equação (2.17) pode ser escrita da seguinte forma:

$$u(x,t) = f(x_1 - ct) + g(x_2 + ct) = u \downarrow + u \uparrow \quad (2.18)$$

2.3.2 Comportamento da extremidade da haste

Após passado o tempo ℓ/c (ℓ é o comprimento da haste e c é velocidade de propagação da onda), a onda de impacto atinge a ponta da haste. As características da onda refletida e da onda transmitida ao solo vão depender das condições do solo abaixo da ponta do amostrador.

Duas condições limites que podem ocorrer são a resistência da ponta ser nula ($R_p = 0$), ou seja, a ponta se encontrar livre ou a resistência do solo é tal que confere uma situação de engaste do amostrador ($R_p = \infty$), ou seja, o deslocamento é nulo ($x = 0$). Estas condições são ilustradas na Figura 2.10.

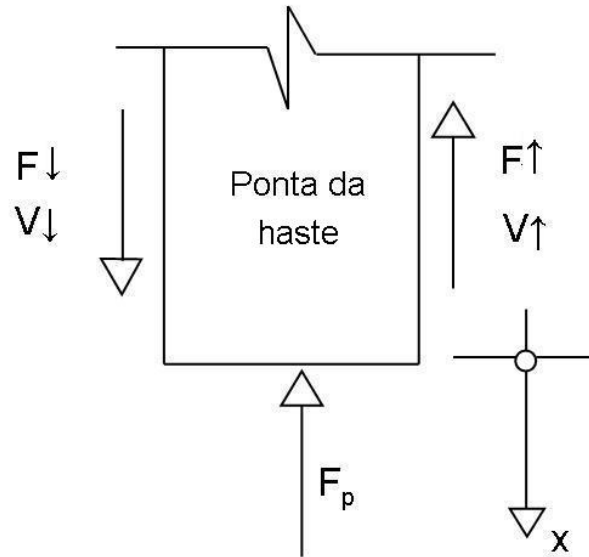


Figura 2.10: Condições de contorno na ponta da haste (Skov, 1982).

A resistência (R_p) e a velocidade de ponta (V_p) da haste são obtidas pelas equações de equilíbrio e compatibilidade, respectivamente:

$$R_p = F \downarrow + F \uparrow \text{ (equilíbrio)} \quad (2.19)$$

$$V_p = V \downarrow + V \uparrow \text{ (compatibilidade)} \quad (2.20)$$

No caso de $R_p = 0$, em que a extremidade da haste está livre, a ponta se desloca e a onda sofre uma reflexão, gerando uma onda de tração. A superposição da onda de compressão e de tração acaba duplicando a velocidade da partícula na ponta da haste, conforme mostrado a seguir.

$$R_p = 0 \Rightarrow F \uparrow = -F \downarrow \quad (2.21)$$

$$V_p = V \downarrow + V \uparrow \quad (2.22)$$

$$V_p = F \downarrow / Z - F \uparrow / Z \quad (2.23)$$

$$V_p = F \downarrow / Z - (-F \uparrow / Z) = 2F \downarrow / Z = 2V \downarrow \quad (2.24)$$

Para a onda refletida na extremidade livre da haste a partícula tem velocidade positiva (descendente) e força negativa (tração). Neste caso, conforme exposto em Odebrecht (2003), os sinais dessa onda refletida sofrerão uma superposição do sinal refletido com a primeira onda de compressão descendente cujos resultados mostrarão uma redução da força e um aumento da velocidade. A Figura 2.11 (a) mostra o efeito apresentado acima.

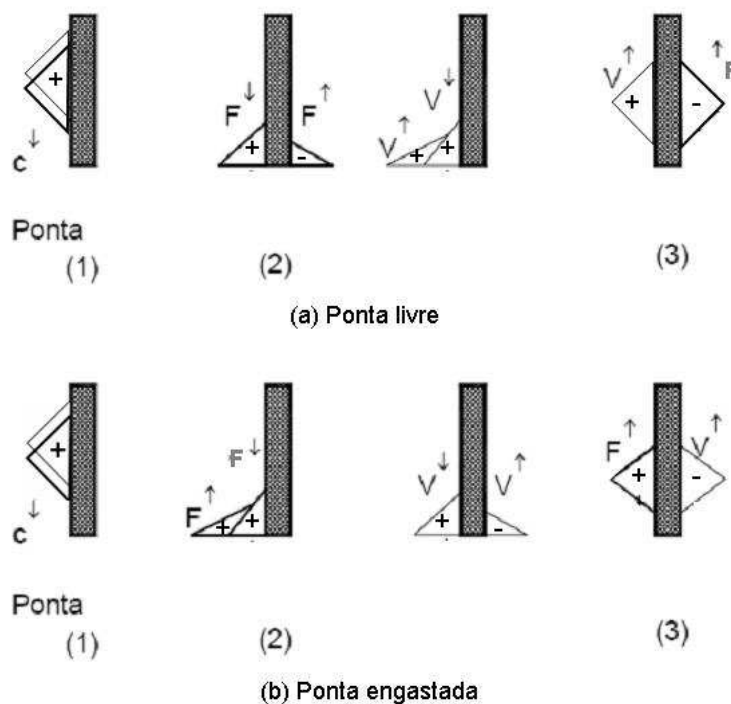


Figura 2.11: Reflexão das ondas de força e velocidade na ponta da haste (Skov, 1982).

No caso da segunda suposição ($x = 0$), ponta engastada, a velocidade da partícula é nula resultando numa duplicação da força, como mostrado a seguir e ilustrado na Figura 2.11 (b).

$$V_p = 0 \Rightarrow V \uparrow = -V \downarrow \quad (2.25)$$

$$R_p = F \downarrow + F \uparrow \quad (2.26)$$

$$R_p = ZV \downarrow - ZV \uparrow \quad (2.27)$$

$$R_p = ZV \downarrow - (-ZV \uparrow) = 2ZV \downarrow = 2F \downarrow \quad (2.28)$$

Neste caso a onda refletida é uma onda de compressão com as velocidades das partículas negativas, o que provocará um aumento da força e uma diminuição da velocidade quando superposta à primeira onda de impacto inicial.

No caso da haste ter a extremidade semi-engastada, sua análise é realizada impondo a condição de que a força final na extremidade semi-engastada é igual a resistência oferecida pelo solo. Ou seja:

$$R_p = F \downarrow + F \uparrow \quad (2.29)$$

$$F \uparrow = R_p - F \downarrow \quad (2.30)$$

Analisando as equações acima e levando em consideração o fato de que a onda longitudinal descendente é de compressão, pode-se concluir que:

- a) se R_p for igual a $F \downarrow$ não haverá onda longitudinal refletida na extremidade;
- b) se R_p é maior que $F \downarrow$ a onda longitudinal refletida será de compressão;
- c) se R_p é menor que $F \downarrow$ a onda longitudinal refletida será de tração.

A velocidade na extremidade da haste pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$V = V \downarrow + V \uparrow = F \downarrow / Z - (R_p - F \downarrow) / Z = (2F \downarrow - R_p) / Z \quad (2.31)$$

Para que seja mobilizada a força do solo R_p , deverá obrigatoriamente haver um pequeno deslocamento da ponta da haste e quanto menor esse deslocamento menor é a onda de tração gerada na ponta da haste. A onda refletida é o resultado da superposição dessa onda de tração com a primeira onda de compressão descendente. Nesse caso, para pequenas deformações a onda refletida predominante é a de compressão e para grandes deformações a onda refletida é de tração.

2.3.3 Efeito do atrito lateral na haste

Observando a Figura 2.12, e estabelecendo compatibilidade das forças e das velocidades entre as seções compreendidas antes e após o ponto de atrito (W), tem-se:

$$F_1 \downarrow + F_1 \uparrow = F_2 \uparrow + F_2 \downarrow + W \quad (2.32)$$

$$V = F_1 \downarrow / Zh_1 - F_1 \uparrow / Zh_1 = -F_2 \uparrow / Zh_2 + F_2 \downarrow / Zh_2 \quad (2.33)$$

Como a haste não muda de material e seção, $Zh_1 = Zh_2$ (mesma impedância):

$$F_1 \uparrow = F_2 \uparrow + 1/2W \quad (2.34)$$

$$F_2 \downarrow = F_1 \downarrow - 1/2W \quad (2.35)$$

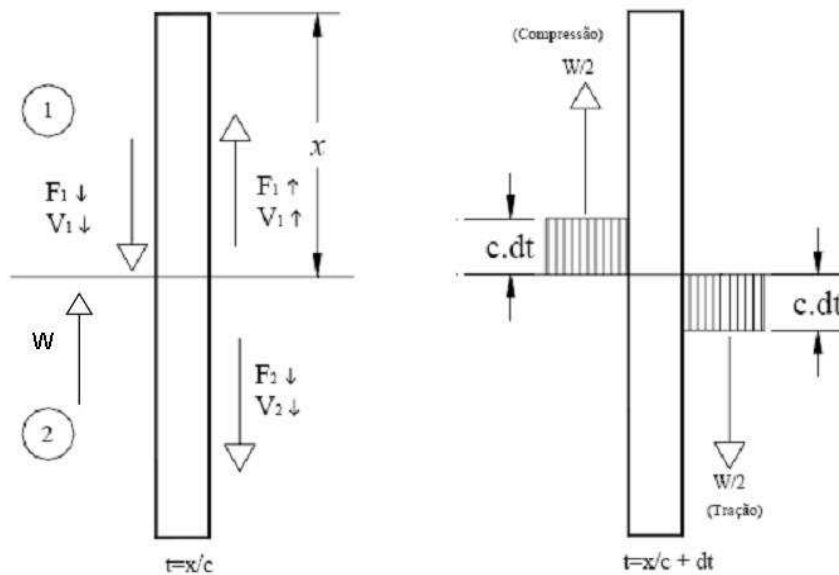


Figura 2.12: Ondas geradas num ponto intermediário da haste (Gonçalves *et al*, 2000).

Pela análise das equações acima, a amplitude da força da onda descendente é reduzida da metade do atrito lateral, enquanto a amplitude da força ascendente é aumentada da metade do atrito lateral (Odebrecht, 2003).

2.3.4 Variação da impedância da haste

Quando uma haste apresenta descontinuidade a uma profundidade x de seu comprimento, por exemplo, na junção do conjunto de hastes com o amostrador, suas características a partir de um determinado local são alteradas, fazendo com que os segmentos superior e inferior tenham uma impedância Z_1 e Z_2 , respectivamente. Tal situação está ilustrada na Figura 2.13.

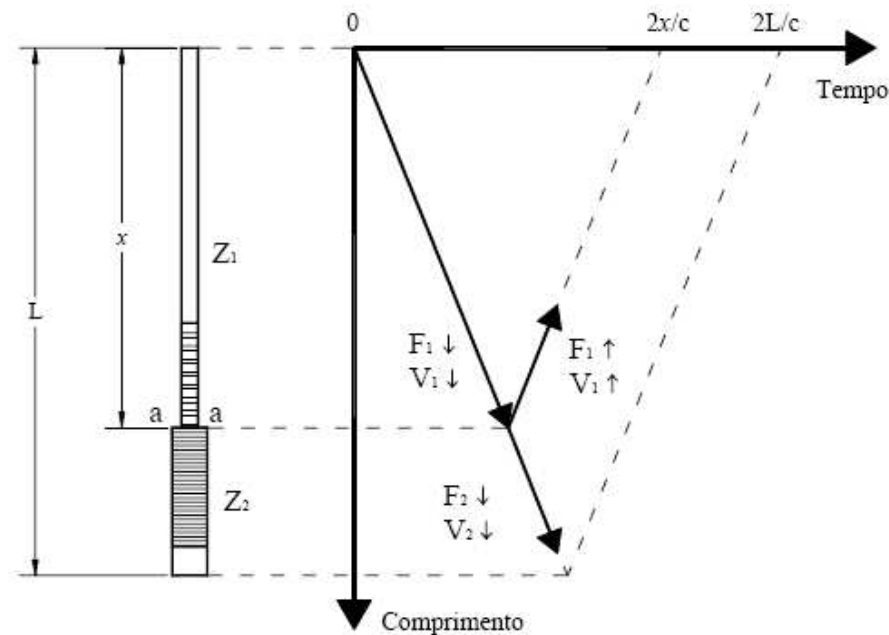


Figura 2.13: Propagação da onda de tensão de descontinuidade (Skov, 1982).

De acordo com Odebrecht (2003) essa mesma descontinuidade pode ser observada no elemento de ligação de uma haste com outra, ou seja, na luva.

Assim, quando a onda inicial ($F_1\downarrow$, $V_1\downarrow$) chega ao ponto onde a seção está modificada, ela será parcialmente transmitida ($F_2\downarrow$, $V_2\downarrow$) e parcialmente refletida ($F_1\uparrow$, $V_1\uparrow$). As forças e as velocidades estão em equilíbrio acima e abaixo da descontinuidade, logo:

$$F = F_1 \downarrow + F_1 \uparrow = F_2 \downarrow \text{ (equilíbrio)} \quad (2.36)$$

$$V = V_1 \downarrow + V_1 \uparrow = V_2 \downarrow \text{ (compatibilidade)} \quad (2.37)$$

Resolvendo simultaneamente as equações (2.36) e (2.37), a força e a velocidade transmitidas são dadas pelas seguintes equações:

$$F_2 \downarrow = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow \quad (2.38)$$

$$V_2 \downarrow = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} V_1 \downarrow \quad (2.39)$$

Substituindo $F_2 \downarrow$ na equação (2.36) e $V_2 \downarrow$ na equação (2.37), a força e a velocidade refletidas são respectivamente:

$$F_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow \quad (2.40)$$

$$V_1 \uparrow = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} V_1 \downarrow \quad (2.41)$$









Na Tabela 2.2 são apresentados os resultados das ondas refletidas que podem ocorrer devido à descontinuidade, dependendo da relação Z_1 e Z_2 .

Quando a haste tem uma seção uniforme, ou seja, $Z_1 = Z_2$, a onda transmitida será igual à onda inicial e não haverá onda refletida.

Porém, se ocorrer redução na seção da haste ($Z_1 > Z_2$), uma onda de tração será refletida sobreposta a onda inicial, fazendo com que haja uma redução no valor da força e um aumento no valor da velocidade no topo da haste após decorridos o tempo $t = 2x/c$ (Figura 2.13).

No caso de $Z_1 < Z_2$, aumento de seção, a onda refletida será de compressão, resultando numa redução da velocidade e aumento da força no topo da haste.

Tabela 2.2: Ondas refletidas pela descontinuidade da haste.

Onda	$Z_1 = Z_2$	$Z_1 \gg Z_2$	$Z_1 \ll Z_2$
Onda inicial			
Onda refletida	0		
Onda transmitida			
$V_1 \uparrow = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} V_1 \downarrow$	0	$V_1 \downarrow$	$-V_1 \downarrow$
$F_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow$	0	$-F_1 \downarrow$	$F_1 \downarrow$
Onda refletida	0	Tração	Compressão

(Fonte: Gonçalves *et al.*, 2000).

2.4 CONCEITOS DE ENERGIA NO ENSAIO SPT

Odebrecht (2003) apresenta novos conceitos para a interpretação do ensaio SPT, a partir da qual é possível estimar uma força dinâmica F_d de reação do solo à penetração do amostrador SPT, obtida a partir do balanço entre a energia inserida no sistema, a despendida durante a propagação de ondas na composição de hastes e amostrador e a energia que retorna sob a forma de uma onda de tração.

O processo de cravação do amostrador no solo pode ser analisado sob dois aspectos: segundo o modo de transferência de energia e segundo o tempo. Conforme o esquema da Figura 2.14 pode-se observar o processo de cravação do amostrador no solo devido à aplicação de um golpe.

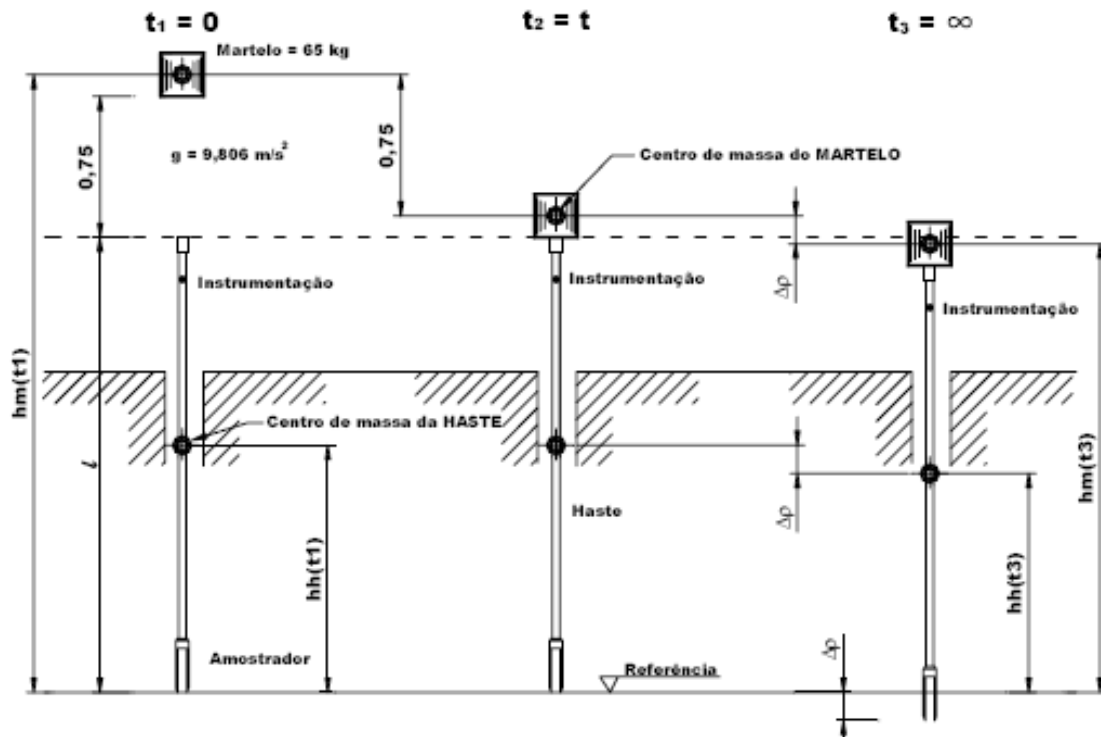


Figura 2.14: Estágios de cravação do amostrador no solo (Odebrecht, 2003).

O instante $t_1 = 0$ corresponde ao instante imediatamente antes da liberação em queda livre do martelo. O tempo $t_2 = t$ corresponde ao instante imediatamente anterior ao impacto do martelo sobre a cabeça de bater e, $t_3 = \infty$ corresponde ao tempo em que todo processo de cravação do amostrador no solo já ocorreu. Neste instante, as energias potencial gravitacional do martelo e da haste já foram consumidas durante cravação do amostrador no solo, devolvidas elasticamente e amortecidas dinamicamente no interior do martelo e da haste.

Em termos de transferência de energia, verifica-se que quando o martelo é posicionado a certa altura, o sistema possui uma energia potencial que, quando o martelo é liberado transforma-se em energia cinética e em perdas por atrito (cordas e roldanas). Quando o martelo atinge a extremidade superior da haste ele produz uma onda de compressão que se propaga ao longo da composição, produzindo a cravação do amostrador no solo.

O processo de cravação do amostrador no solo somente inicia a partir da chegada da primeira onda de compressão no amostrador. Equacionando as energias contidas em cada fase pode-se entender este processo.

2.4.1 Energias contidas no processo de cravação do amostrador no solo

A energia potencial gravitacional do martelo (EPG_m) pode ser determinada em relação a um referencial fixo, externo ao sistema, conforme equação (2.42).

$$EPG_m = M_m g h_{m(t_1)} \quad (2.42)$$

onde: M_m = massa do martelo;

g = aceleração da gravidade;

$h_{m(t_1)}$ = cota do centro de massa do martelo em relação ao referencial.

A energia potencial gravitacional da haste (EPG_h) deve ser igualmente determinada em relação a um referencial fixo, externo ao sistema.

$$EPG_h = M_h g h_{h(t_1)} \quad (2.43)$$

onde: M_h = massa da haste;

g = aceleração da gravidade;

$h_{h(t_1)}$ = cota do centro de massa da haste em relação ao referencial fixo.

A diferença da energia potencial gravitacional do martelo e da haste após a penetração pode ser calculada simplesmente pela diferença entre cotas no instante t_1 e t_3 , ou seja:

$$\Delta h_m = h_{m(t_1)} - h_{m(t_3)} = 0,75m + \Delta\rho \quad (2.44)$$

$$\Delta h_h = h_{h(t_1)} - h_{h(t_3)} = \Delta\rho \quad (2.45)$$

sendo: $\Delta\rho$ a penetração permanente do amostrador devido à aplicação de um golpe.

Desta forma, a variação da energia gravitacional do martelo entre t_1 e t_3 , pode ser calculada pela equação (2.46).

$$\Delta EPG_m = E^* + M_m g \Delta\rho \quad (2.46)$$

onde: E^* é a energia potencial gravitacional teórica segundo a Norma Brasileira NBR 6484. ($E^* = M_m \cdot g \cdot 0,75 = 65.9806 \cdot 0,75 = 478J$).

A variação da energia potencial gravitacional da haste não deve ser desprezada, pois no caso de hastes com comprimentos longos, sua contribuição para a cravação do amostrador no solo é significativa. Esta variação de energia pode ser calculada pela equação (2.47).

$$\Delta EPG_h = M_h g \Delta \rho \quad (2.47)$$

A energia efetivamente consumida na cravação do amostrador no solo é dada pela soma da variação da energia potencial gravitacional do martelo e da haste. Considerando-se um referencial externo ao sistema, a energia produzida por um golpe será função da altura de queda teórica ($0,75 \text{ m} + \Delta \rho$) e, como consequência, a energia efetivamente empregada na cravação da composição quando submetida a um golpe de um martelo de massa M_m passa a ser função das seguintes variáveis: altura de queda do martelo, tipo de solo que determina a magnitude de $\Delta \rho$ e geometria (comprimento e seção) das hastes que determinam sua massa. Soma-se a estas variáveis os fatores relativos às características do ensaio e equipamento utilizado (sistema de elevação e de liberação do martelo, dimensões da cabeça de bater, uso de coxim de madeira dura, etc.), cuja influência no valor de N_{SPT} é reconhecida internacionalmente e expressa através da eficiência do equipamento (Skempton, 1986).

A energia potencial gravitacional do sistema, considerando simultaneamente martelo, haste e solo, responsável pela efetiva penetração do amostrador é expressa como:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = E^* + M_m g \Delta \rho + M_h g \Delta \rho \quad (2.48)$$

Assim, a energia consumida para a cravação do amostrador no solo é obtida em função da altura de queda do martelo, da penetração permanente do amostrador no solo e das massas da haste e do martelo. Por conveniência, a equação (2.48) terá seus termos rearranjados, tendo a sua primeira parcela representada pela variação da energia do martelo e a segunda, referente à energia da haste.

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = (0,75 + \Delta \rho) M_m g + \Delta \rho M_h g \quad (2.49)$$

No trabalho de Odebrecht (2003) pode-se verificar a influência da magnitude da penetração e da massa da haste na energia transferida para o amostrador. Para isso apresenta-se a razão

$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ expressa em função do valor de N_{SPT} e do comprimento da haste, como pode ser observado nas Tabelas 2.3 e 2.4.

A Tabela 2.3 considera a situação de furo de sondagem completamente seco, já na Tabela 2.4 o furo de sondagem está completamente inundado (da massa da haste deve ser descontada a massa referente ao volume de água deslocado pela haste – empuxo).

Tabela 2.3: Relação de energia $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ para o caso de furo de sondagem seco.

		Relação de energia $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$														
		Comprimento da haste (m)														
N		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
2		1.22	1.24	1.26	1.28	1.30	1.32	1.34	1.36	1.38	1.40	1.42	1.44	1.46	1.48	1.50
4		1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25
6		1.07	1.08	1.09	1.09	1.10	1.11	1.11	1.12	1.13	1.13	1.14	1.15	1.15	1.16	1.17
8		1.06	1.06	1.07	1.07	1.07	1.08	1.08	1.09	1.09	1.10	1.10	1.11	1.11	1.12	1.12
10		1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.07	1.07	1.08	1.08	1.08	1.09	1.09	1.10	1.10
12		1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.07	1.07	1.07	1.08	1.08	1.08
14		1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.07	1.07	1.07
16		1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06
18		1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06
20		1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05
22		1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05
24		1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04
26		1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04
28		1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04
30		1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03

(Fonte: Odebrecht, 2003).

Tabela 2.4: Relação de energia $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ para o caso de furo de sondagem completamente inundado.

		Relação de energia $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$														
		Comprimento da haste (m)														
N		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
2		1.22	1.23	1.25	1.27	1.29	1.30	1.32	1.34	1.36	1.37	1.39	1.41	1.43	1.44	1.46
4		1.11	1.12	1.13	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.20	1.21	1.22	1.23
6		1.07	1.08	1.08	1.09	1.10	1.10	1.11	1.11	1.12	1.12	1.13	1.14	1.14	1.15	1.15
8		1.05	1.06	1.06	1.07	1.07	1.08	1.08	1.08	1.09	1.09	1.10	1.10	1.11	1.11	1.12
10		1.04	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.07	1.07	1.07	1.08	1.08	1.09	1.09	1.09
12		1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.07	1.07	1.07	1.07	1.08
14		1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.06	1.07
16		1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06
18		1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05	1.05
20		1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05
22		1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
24		1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04
26		1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04
28		1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
30		1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03

(Fonte: Odebrecht, 2003).

Analisando as Tabelas 2.3 e 2.4, Odebrecht (2003) obteve algumas conclusões relevantes: para solos resistentes (N_{SPT} acima de 15 golpes) combinados à comprimentos de hastes inferiores à 20 m, os valores de $\Delta EPG_{m+h}^{sistema}$ são muito próximos de E^* , sugerindo que a formulação tradicional para pequenas penetrações é aceitável para a correção do valor do N_{SPT} para o valor de referência N_{60} . Esta condição pode ser observada nas áreas não hachuradas das tabelas, onde a razão de $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ é da ordem de 1,01 a 1,04 (erros de 2 a 3%). Entretanto, nas áreas hachuradas das tabelas existem diferenças significativas entre $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ (superior a 10%). Os valores mostrados nas Tabelas 2.3 e 2.4 de razões $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ indicam ainda ser possível obter eficiências superiores a 100%, que podem ser justificáveis pela ocorrência de energia transferidas para às hastes. Neste caso o valor de N_{SPT} deve ser corrigido, principalmente para grandes profundidades, fazendo uso da energia transferida do sistema pela equação (2.49), ao invés de utilizar o valor da energia teórica de referência de energia E^* .

Entre as várias interpretações que resultam das análises referentes a medidas de energia no ensaio SPT apresentadas no trabalho de Odebrecht (2003), uma das mais interessantes refere-se ao entendimento do trabalho exercido sobre o solo pela penetração do amostrador. O

trabalho entregue ao solo é dado pela equação (2.50), baseada no princípio de Hamilton, o qual estabelece que a soma da variação no tempo das energias cinéticas e potenciais e o trabalho efetuado por forças não conservativas ao longo de um intervalo de tempo t_1 a t_2 é igual à zero. Este princípio teve sua aplicação no ensaio SPT sugerida por Aoki & Cintra (2000). Adotando a nomenclatura apresentada em Clough e Penzien (1975) a equação que descreve o princípio de Hamilton é dada por:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta[T(t) - V(t)]dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta[W_s(t) + W_{nc}(t)]dt = 0 \quad (2.50)$$

onde: $T(t)$ = energia cinética;

$V(t)$ = energia Potencial;

$W_s(t)$ = trabalho efetuado por forças não conservativas na ponta do amostrador (sobre o solo);

W_{nc} = trabalho efetuado por forças não conservativas (perdas diversas);

δ = variação;

t_1 = tempo inicial do período considerado (ver Figura 2.14);

t_2 = tempo final do período considerado (ver Figura 2.14).

Considerando a Figura 2.14 e t_1 (Hamilton) igual ao instante zero (Figura 2.14) e o t_2 (Hamilton) igual ao instante (t_3 da Figura 2.14) em que todas as energias cinéticas e elásticas já foram dissipadas, ou seja, não há em t_1 e t_2 energias cinéticas tem-se:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta V(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} \delta[W_s(t) + W_{nc}(t)]dt \quad (2.51)$$

Dessa forma, a variação da energia potencial do sistema martelo-haste é igual à variação do trabalho efetuado por forças não conservativas. Como a variação da energia potencial é dada pela equação (2.48), este valor pode ser reescrito na forma da variação do trabalho efetuado pelas forças não conservativas, assim:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = W_s + W_{nc} \quad (2.52)$$

Como o trabalho efetivamente entregue ao solo é conhecido (equação 2.48) e proporcional à penetração do amostrador, a força dinâmica F_d média de reação do solo à cravação do amostrador pode ser representada pelas equações (2.53) e (2.54).

$$E_s = T = \Delta EPG_{m+h}^{sistema} \text{ com perdas} = W_s = F_d \times \Delta\rho \quad (2.53)$$

$$F_d = \Delta EPG_{m+h}^{sistema} \text{ com perdas} / \Delta\rho \quad (2.54)$$

Para a utilização e aplicação da formulação anteriormente apresentada, Odebrecht (2003) afirma que há necessidade de quantificar as perdas de energia durante a cravação do amostrador no solo determinando a eficiência do ensaio.

Revedo o conceito fundamental contido no trabalho de Schmertman & Palácios (1979) pode-se avaliar a eficiência do ensaio SPT. Neste trabalho a hipótese adotada é de que a energia transferida para as hastes devido à aplicação de um golpe de martelo ocorre integralmente durante o primeiro impacto do martelo sobre a composição. Assim, a energia que chega ao amostrador deve ser obtida pela integração da primeira onda de compressão até o tempo necessário para a onda atingir o topo do amostrador ($2l/c$). Assim, a eficiência do sistema aumenta com o comprimento da haste.

O conhecimento da eficiência do ensaio SPT é representado pela quantificação das perdas de energia durante o ensaio, por meio de instrumentação que registra a passagem da onda longitudinal de compressão, gerada pela ação de um golpe de martelo, através da integração do produto da força e da velocidade ao longo do tempo, determinando assim a energia contida nesta onda de compressão.

Com este objetivo, Odebrecht *et al* (2004) instrumentou as hastes do amostrador SPT com uma célula de carga e um par de acelerômetros. A partir daí, realizou uma bateria de ensaios de campo utilizando quatro comprimentos de hastes distintos: 5,80 m, 11,80 m, 18,18 m e 35,80 m, mantendo-se constantes as demais variáveis (equipamento, equipe, cabeça de bater, martelo, cabo de içar o martelo, amostrador e solo). Os procedimentos de ensaio e equipamentos seguiram as recomendações da NBR 6484/2001. O amostrador foi cravado em areia disposta em uma câmara de calibração (tanque no qual a pressão vertical é controlada através de uma membrana flexível posicionada abaixo da tampa) com diâmetros de 56 cm e altura de 84 cm (200 litros). A areia era lançada em camadas e compactada, sua umidade foi

avaliada e volume determinado. A densidade relativa deste material foi mantida constante, em torno de $70\% \pm 5\%$.

Para cada composição foram adquiridos sinais de força e aceleração. Durante cada golpe foi registrado, com o auxílio de uma régua, a penetração permanente por golpe e, para cada comprimento de haste, com exceção da haste de 5,80 m, foram adquiridos sinais junto à cabeça de bater, junto ao amostrador e no centro da composição. Para a composição de 5,80 m, foram adquiridos somente sinais junto à cabeça de bater e junto do amostrador.

Quando o martelo atinge a cabeça de bater é gerada uma onda de compressão descendente que se propaga verticalmente que, quando atinge o amostrador, o faz deslocar-se e produzir também uma onda refletida de tração ascendente. Esta onda de tração ascendente, ao atingir a cabeça de bater, produz uma separação física entre a haste e o martelo interrompendo a transferência de energia. A seguir o martelo volta a entrar em contato com a haste gerando o segundo impacto e uma nova onda de compressão, reproduzindo o mecanismo citado anteriormente.

Para melhor compreender o mecanismo de transferência de energia para o amostrador SPT, serão apresentados sinais típicos obtidos nos ensaios em hastes longas (35,8 m), conforme Figura 2.15.

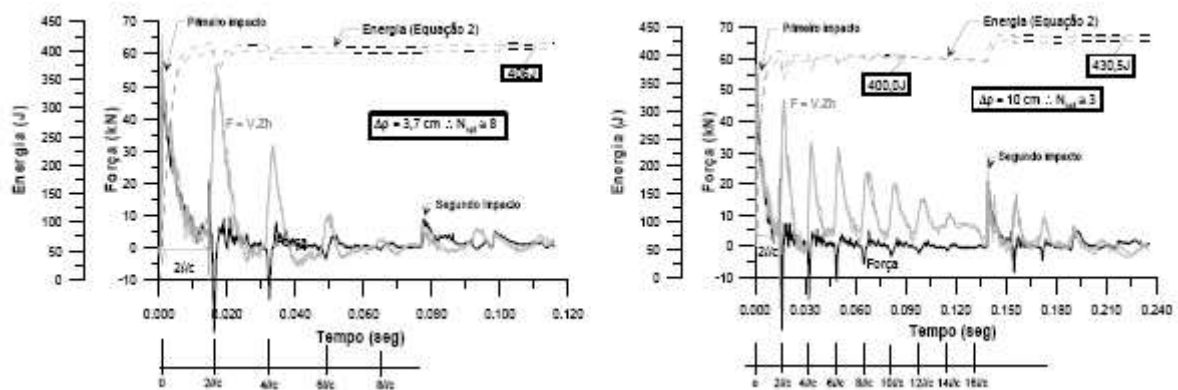


Figura 2.15: Sinal típico de uma haste longa: 35,80 m (Odebrecht *et al.*, 2004).

Na Figura 2.15 são apresentados os sinais de força registrados pela célula de carga, os sinais de força obtidos pela multiplicação dos sinais de velocidade pela impedância da haste e a

evolução da energia transferida às hastes, todos ao longo do tempo. Observando os sinais, Odebrecht *et al* (2004) avaliou duas situações: um golpe que produz uma penetração permanente discreta no amostrador (N_{SPT} da ordem de 8 golpes, $\Delta\rho = 3,7$ cm) e um golpe que produz uma penetração permanente mais pronunciada (N_{SPT} da ordem de 3 golpes, $\Delta\rho = 10$ cm).

No caso de haste longa, relacionada a uma pequena penetração permanente ($\Delta\rho = 3,7$ cm) a energia transferida às hastes ocorre basicamente durante um intervalo de tempo contido entre o início do golpe e $2l/c$, que corresponde à energia da primeira onda de compressão. As reflexões de impactos subsequentes do martelo não influenciam mais na energia transferida às hastes, atingindo um valor máximo de 406 J. Dessa forma, de acordo com Odebrecht *et al* (2004), todo o mecanismo de transferência de energia, que produziu o referido deslocamento no amostrador, ocorre durante um intervalo de tempo $2l/c$ (concordância com resultados de Schmertmann & Palácios, 1979). Neste caso, a energia transferida para a haste corresponde à primeira onda de compressão, devido à aplicação de um golpe de martelo podendo ser determinada pela equação (2.55).

$$E = \int_{t=0}^{t=2L/c} F(t)V(t)dt \quad (2.55)$$

Já no caso de haste longa na qual a penetração é maior, o segundo impacto do martelo contribui de forma significativa no valor da energia efetivamente entregue à composição de hastes. Observa-se que a energia entregue à composição é distinta nos dois casos analisados, sugerindo que, para hastes longas, quanto maior a penetração do amostrador no solo, maior será a energia transferida às hastes, resultante do impacto do segundo golpe do martelo. Neste caso a energia transferida para as hastes aumenta para 430 J. Para hastes curtas Odebrecht *et al* (2004) demonstrou que o segundo e o terceiro impacto contribuem no valor final de energia transferida para as hastes.

Como conclusão, Odebrecht (2003) sugere que, tanto para hastes longas como para hastes curtas, o intervalo de integração deve ser suficientemente grande a fim de permitir que os vários impactos decorrentes de um golpe sejam considerados. Com isto, a equação (2.55) deve ser reescrita na seguinte forma:

$$E = \int_{t=0}^{t=\infty} F(t)V(t)dt \quad (2.56)$$

A partir dos valores de energia obtidos pelos sinais registrados é possível obter a eficiência do ensaio SPT. Com o objetivo de identificar as perdas que ocorrem durante o processo de propagação de ondas ao longo da composição de hastes, Odebrecht (2003) comparou a energia contida em cada posição instrumentada da haste. Para cada sinal adquirido determinou-se a energia da onda de compressão pela integração do sinal de força *versus* aceleração ao longo do tempo, cujos resultados estão demonstrados na Figura 2.16.

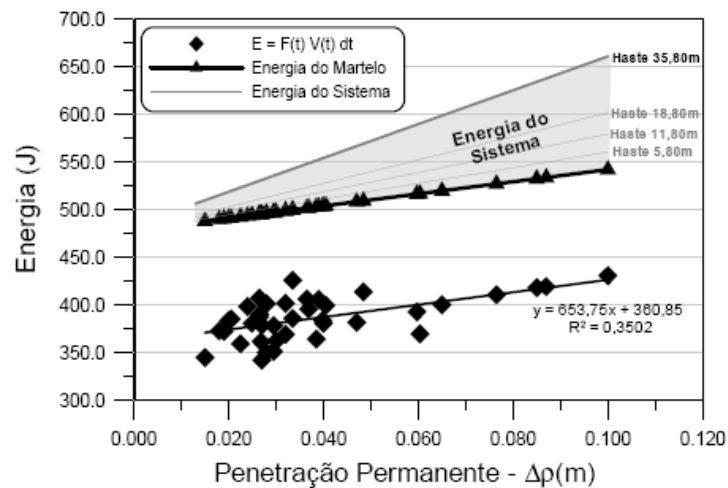


Figura 2.16: Energia versus penetração (Odebrecht, 2003).

De acordo com Odebrecht (2003), a variação dos golpes, observada na Figura 2.16, é decorrente da posição do amostrador dentro do tanque de areia. No início da penetração, a resistência é dada pela resistência de ponta do amostrador. No decorrer da cravação, soma-se à resistência de ponta a parcela de atrito lateral e com isso, observa-se uma ligeira redução da penetração ao longo da cravação do amostrador na câmara. Este processo pode ser também observado em campo, incluindo-se os efeitos de embuchamento durante a penetração.

Observa-se ainda que existe uma perda de energia constante, ou uma relação linear entre a energia contida na onda longitudinal com a energia do martelo, independente do comprimento da composição. Porém, a eficiência tem um ligeiro aumento com o aumento da penetração. Observa-se também que, para hastes curtas, a energia do sistema e a parcela referente ao martelo são bem próximas, devido à pequena parcela de energia referente à haste. A linha de

tendência referente à energia do sistema e a referente ao martelo apresentam uma diferença mais significativa, demonstrando um aumento da influência do comprimento da haste. Estes fatos indicam que há uma relação entre a energia da onda medida na cabeça de bater e a energia contida no martelo. Devido a este fato, deve-se acrescentar à equação (2.49) um coeficiente de eficiência do martelo η_l .

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \eta_l (0,75 + \Delta\rho)M_m g + \Delta\rho M_h g \quad (2.57)$$

Onde: $\eta_l = \text{eficiência referente à parcela do martelo} = \frac{\int_0^{\infty} F(t)V(t)dt}{(0,75 + \Delta\rho)M_m g}$

No valor de η_l estão contidas todas as perdas referentes ao atrito no cabo de içar, do martelo com a roldana, perdas no golpe, estado do cabo, tipo de martelo, etc., ou seja, todas as perdas referentes ao golpe.

Ainda observando a Figura 2.16 percebe-se que, para hastes curtas, não há uma definição clara entre a energia contida na onda de compressão e a parcela de energia referente ao martelo, mas, para hastes longas, pode-se claramente determinar esta tendência. Este fato comprova, experimentalmente, que a energia contida na onda longitudinal é dependente do tipo de solo, ou seja, o valor do N_{SPT} depende do equipamento, da equipe e do solo.

Com base nas evidências experimentais observadas e considerando que existe uma relação linear entre a energia contida na onda longitudinal e a respectiva parcela referente ao martelo, Odebrecht (2003) conclui que a perda é constante para as distintas penetrações, contudo a eficiência tem um ligeiro aumento à medida que a penetração aumenta.

Com base no acima exposto, considerando uma perda constante é possível determinar o valor de η_l pela razão das duas energias. O valor obtido na análise de Odebrecht (2003), é de 0,764 com desvio padrão de 0,036. Na Figura 2.17 é aplicado este valor de η_l para os dados apresentados na Figura 2.16 em função do comprimento da haste, no qual observa-se que o valor de η_l independe do comprimento da haste.

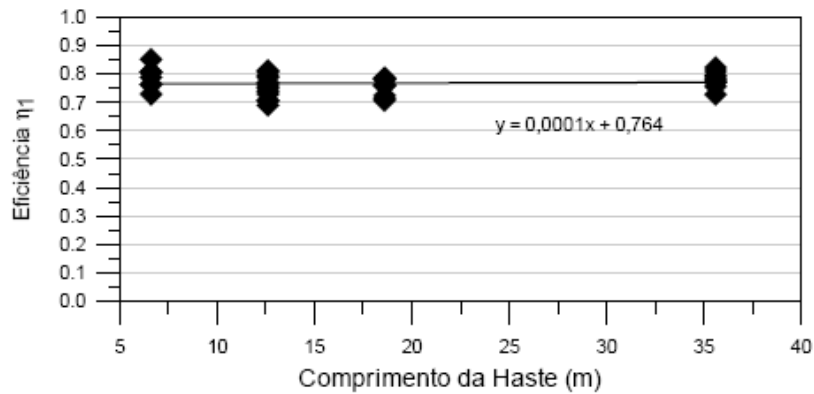


Figura 2.17: Eficiência η_1 em função do comprimento da haste (Odebrecht, 2003).

À luz desta análise, Odebrecht (2003), realizou uma retro-análise dos resultados da pesquisa efetuada por Cavalcante (2002). Na pesquisa de Cavalcante (2002) foram utilizados equipamentos e equipes distintas, com características executivas de duas regiões do Brasil (Rio de Janeiro e João Pessoa), em diferentes tipos de solos.

Desta análise tem-se um valor de η_1 na ordem de 0,761 com desvio padrão de 0,051, valor este bem semelhante ao determinado por Odebrecht (2003), o que demonstra que o padrão de variação de energia *in situ* é modelado adequadamente no tanque de areia.

Na Figura 2.18 são apresentados os resultados obtidos no cálculo da energia da onda longitudinal de tensão determinada com a instrumentação instalada junto ao amostrador. São apresentados os resultados da energia transferida à haste, as energias calculadas junto à cabeça de bater (energia do sistema), e a parcela de energia referente ao martelo. Apresenta-se também adicionalmente, a título de ilustração, a energia teórica de referência.

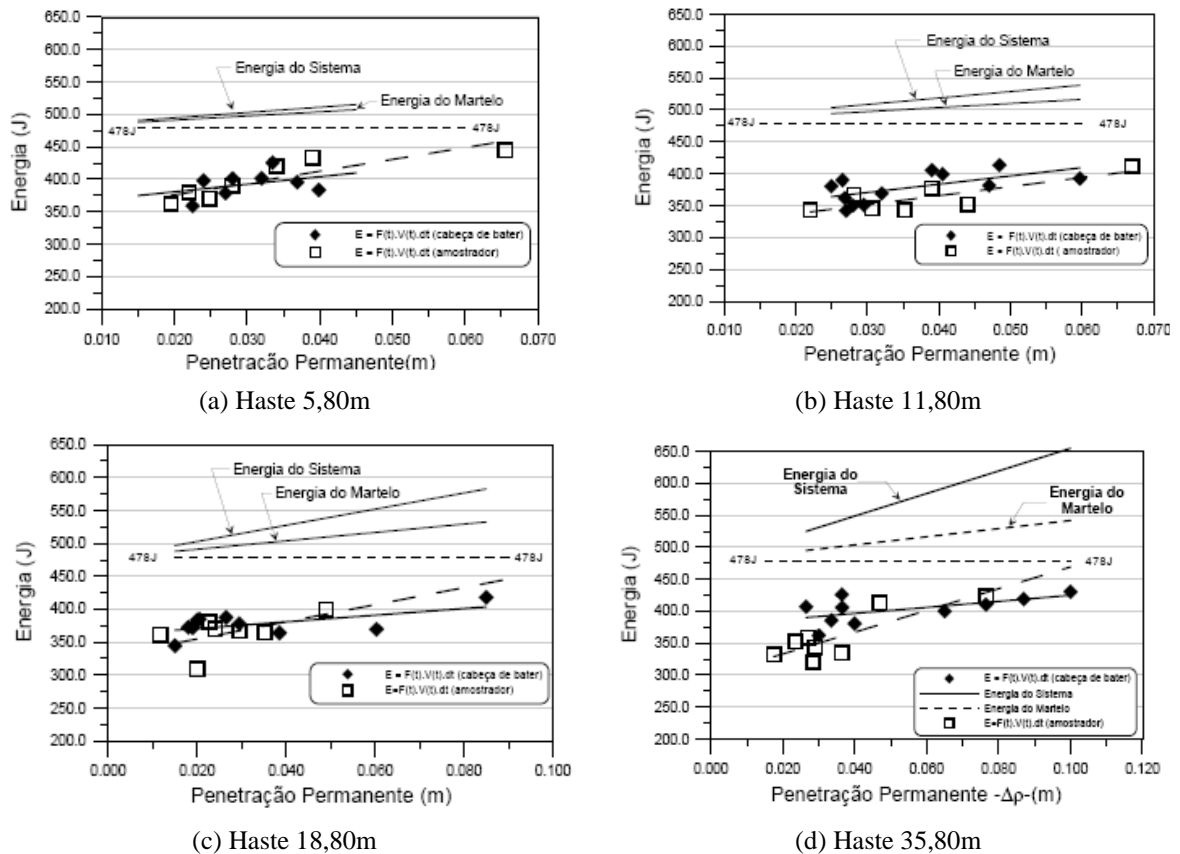


Figura 2.18: Energia versus Penetração (Odebrecht, 2003).

Analisando a Figura 2.18, pode-se perceber que há uma perda adicional de energia transferida à haste, ocorrendo entre a cabeça de bater e o amostrador, sendo mais pronunciada para as hastes longas (18,80 m e 35,80 m). Portanto, estes gráficos indicam que devem ser acrescentados à equação (2.57) dois fatores adicionais de correção: o fator η_2 que representa as perdas ao longo das hastes e o fator η_3 que representa a eficiência do sistema. Assim, a equação (2.49) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \eta_3 [\eta_1 (0,75 + \Delta\rho) M_m g + \eta_2 \Delta\rho M_h g] \quad (2.58)$$

Onde: $\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 l$ e $\eta_3 = \beta_3 + \alpha_3 l$

Para determinar os coeficientes η_2 e η_3 , Odebrecht (2003) adotou várias hipóteses e, a que melhor se ajustou aos dados experimentais considera que $\eta_2 = 1$ e η_3 é expresso em função do comprimento das hastes, conforme a equação (2.59).

$$\eta_3 = 1 - 0,0042l \quad (2.59)$$

Odebrecht (2003), novamente retro-analisou os dados de Cavalcante (2002) e obteve valores de $\eta_2 = 1$ e $\eta_3 = 0,907-0,0066l$. Segundo Odebrecht (2003) este valor de η_3 está sujeito a críticas tendo em vista que para um comprimento de haste nulo há perdas de na ordem de 10%, o que não é fisicamente correto.

Com base no que foi exposto é importante mencionar que quanto menor o comprimento das hastes menores serão as perdas ao longo destas e para golpes idênticos a eficiência é maior em hastes curtas, conforme indicou Aoki & Cintra (2000).

Deste modo, a força dinâmica de reação do solo à cravação do amostrador SPT pode ser expressa segundo a equação (2.60):

$$F_d = \frac{\eta_3[\eta_1(0,75 + \Delta\rho)M_m g + \eta_2 \Delta\rho M_h g]}{\Delta\rho} \quad (2.60)$$

Recomenda-se utilizar, na equação (2.119), os valores de $\eta_1 = 0,716$; $\eta_2 = 1$ e $\eta_3 = 0,907-0,0066l$, valores estimados por Odebrecht (2003) através de retro-análise a partir de ensaios SPT realizados por Cavalcante (2002), conforme demonstrado anteriormente.

O conhecimento do valor da força F_d abre uma gama de alternativas de aplicação. Odebrecht (2003) sugeriu a sua aplicação na estimativa de parâmetros de resistência de solos, em argilas o autor estimou a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) e em areias o ângulo de atrito interno (ϕ). Outra proposta é de utilizar na força dinâmica F_d na previsão de capacidade de carga de estacas (Lobo, 2005).

2.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Apesar do ensaio SPT ser a ferramenta mais utilizada no Brasil e no mundo pela Engenharia Geotécnica, este ensaio tem recebido diversas críticas relacionadas à sua padronização. Medições de energia aliadas aos conceitos de dinâmica, vem sendo aplicadas ao ensaio SPT visando uma interpretação racional e a uniformidade de resultados.

Esta dissertação está inserida neste contexto, apresentando como contribuição o uso de conceitos de similaridade aplicados a ensaios dinâmicos. Neste sentido, este capítulo apresentou novas abordagens que buscam entender o modo de transferência de energia e quantificar suas variações, estimando uma força dinâmica de reação do solo à cravação do

amostrador SPT. As medidas de energia possibilitaram a padronização do ensaio e, com isto, a transposição de experiências de resultados obtidos através do uso de equipamentos distintos, porém, realizados seguindo as recomendações da NBR 6484/2001.

Um exemplo desta aplicação é discutido através da utilização de distintos equipamentos de penetração dinâmica, projetados e construídos com o objetivo de simular condições de similaridade em diferentes escalas. Este estudo possibilita a compreensão dos conceitos de energia aplicados à cravação do amostrador SPT através de análises comparativas entre ensaios SPT e ensaios modificados. Assim, será possível verificar numericamente e experimentalmente as semelhanças geométricas envolvidas no processo de cravação dinâmico, avaliar a penetração do amostrador no solo e sua respectiva tensão de ruptura e, portanto, incorporar novos conhecimentos à interpretação do ensaio SPT por meio de um método racional de análise baseado nos conceitos de energia.

3 ANÁLISE DIMENSIONAL E DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta um breve resumo dos conceitos de análise dimensional e sua aplicação à presente pesquisa, realizada com o objetivo de projetar ensaios que simulem condições de similaridade em diferentes dimensões. Com base nesta análise são projetados equipamentos utilizados para a realização de ensaios de penetração dinâmica em solos.

3.2 ANÁLISE DIMENSIONAL

A análise dimensional é um meio para simplificação de um problema físico empregando a Lei da Homogeneidade Dimensional com a finalidade de reduzir o número das variáveis de análise, sendo muito útil para apresentar e interpretar dados experimentais, estabelecer a importância relativa de um determinado fenômeno e na modelar fisicamente experimentos. Carneiro (1996) e Langhaar (1951) apresentam de forma detalhada os conceitos relacionados com a análise dimensional, sendo que uma das suas principais utilidades é o estabelecimento das condições de semelhança física entre os protótipos e os modelos utilizados nas experiências.

De acordo com Carneiro (1996) o princípio da Homogeneidade Dimensional consiste em que toda a equação que exprima uma lei física ou descreva um processo físico deve ser homogênea, relativamente a qualquer mudança do sistema de unidades empregado. Utilizando os princípios das unidades fundamentais ou de base e derivadas neste conceito é possível descrever um fenômeno (por exemplo, um impacto) de n parâmetros em função apenas das

unidades fundamentais envolvidas, tais como massa (M), comprimento (L), tempo (T), temperatura (θ), corrente elétrica (I), intensidade luminosa (I_v) e a quantidade de substância (n). As grandezas correspondentes às unidades fundamentais são denominadas de grandezas fundamentais, que constituem a base do sistema de medidas. As demais unidades e grandezas são denominadas unidades e grandezas derivadas.

Como expresso em Carneiro (1996), a subordinação das unidades derivadas às unidades fundamentais é expressa nas chamadas fórmulas dimensionais. Elas constituem uma forma abreviada de representação das grandezas físicas derivadas. Um exemplo é a velocidade: $[v] = LT^{-1}$, que indica a dimensão de velocidade expressa pelo comprimento dividido por um tempo. O expoente de cada unidade fundamental é chamado de dimensão ou expoente de dimensão.

No Sistema Internacional de Unidades – SI, a base é constituída pelas seguintes grandezas, descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Grandezas Fundamentais no Sistema – SI.

Grandeza Fundamental (Sistema SI)	Símbolos Usuais	Símbolos nas Fórmulas Dimensionais	Unidade SI
1) Comprimento	l, L	L	metro (m)
2) Massa	m, M	M	quilograma (kg)
3) Tempo	t, T	T	segundo (s)
4) Corrente elétrica	i, I	I	Ampère (A)
5) Temperatura Termodinâmica	T, θ	θ	Kelvin (K)
6) Intensidade Luminosa	I, I_v	I_v	Candela (cd)
7) Quantidade de Substância	n	mol, N	mol (mol)

(Fonte: Carneiro, 1996).

3.2.1 Matriz dimensional

O conjunto de parâmetros do problema físico pode ser expresso em um quadro, em forma de matriz, chamado de matriz dimensional. Nas linhas são apresentados os conjuntos de parâmetros derivados que formam o problema e nas colunas o conjunto de grandezas fundamentais. Os elementos da matriz são os expoentes ou dimensões dos parâmetros derivados em relação aos fundamentais. Os fatores de forma, que são adimensionais, não devem ser incluídos na matriz dimensional.

Os parâmetros que figuram nas equações ou relações funcionais que exprimem matematicamente, leis ou processos físicos podem ser, segundo Carneiro (1996): variáveis (independentes ou dependentes), constantes físicas específicas e constantes físicas universais.

As variáveis (dependentes e independentes) são, geralmente, parâmetros dimensionais cujos valores numéricos são medidas de magnitudes de grandezas físicas e dependem das unidades de medida empregadas. Algumas variáveis podem ser adimensionais como, por exemplo, um ângulo (expresso em radianos) e a deformação específica. Quando em um problema figuram diversos parâmetros do mesmo tipo de grandeza, por exemplo, dimensões geométricas, somente um destes parâmetros é escolhido como representativo e os demais são substituídos pela relação deste com o parâmetro representativo. Estes tipos especiais de variáveis adimensionais são denominados fatores de forma. No caso de não ser possível definir completamente a geometria de um corpo por um número finito de parâmetros geométricos, usa-se as funções de forma, as quais são funções que representam a geometria de um corpo (por exemplo, uma superfície curva).

As constantes físicas específicas correspondem a propriedades de substâncias e suas dimensões decorrem de leis físicas específicas que descrevem o comportamento das substâncias. Uma exceção é o coeficiente de *Poisson* que é uma constante física adimensional. As constantes físicas universais, em geral são indispensáveis nos problemas em que coexistem forças de inércia e forças de gravidade, sendo necessário incluir ao lado da massa específica, a intensidade da gravidade g .

Desta maneira, conforme mostrado em Carneiro (1996), a relação funcional que descreve uma lei ou processo físico têm, na sua forma mais geral o seguinte aspecto:

$$f(\text{variáveis dependentes e independentes, constantes físicas específicas, constantes físicas universais, fatores de forma, funções de forma}) = 0$$

Para aplicar com êxito a análise dimensional é necessário que, em cada caso, figure apenas uma variável dependente, que é a incógnita do problema. Deste modo, a relação funcional pode ser expressa como:

$$\text{variável dependente} = f(\text{variáveis independentes, constantes físicas específicas, constantes físicas universais, fatores de forma, funções de forma})$$

Assim, como exposto anteriormente, de posse de todos os parâmetros que figuram no processo físico estudado, é possível formar a matriz dimensional, onde os elementos da matriz são os expoentes ou dimensões dos parâmetros derivados em relação aos fundamentais.

3.2.2 Mudança de base

A substituição de uma base por outra, em análise dimensional, chama-se mudança de base. Este processo ocorre porque para se aplicar com êxito a análise dimensional é indispensável que, em cada caso estudado, figure apenas uma variável dependente que é a incógnita do problema. Porém, na prática, muitas vezes isto não acontece, ou seja, nem sempre as grandezas derivadas são os parâmetros que determinam as relações funcionais do processo físico estudado.

Devido a isso, todos os parâmetros do processo serão grandezas derivadas e, neste caso, será conveniente por meio de uma mudança de base, substituir as grandezas fundamentais (que não figuram diretamente entre os parâmetros do problema) por grandezas derivadas que figuram diretamente no problema a fim de constituir uma nova base.

3.2.2.1 Escolha da nova base

A escolha da nova base é realizada por meio de inspeção e tentativas e deve ser composta de grandezas que figurem diretamente nas relações funcionais de interesse. A nova base do problema deve ter o mesmo número de grandezas que a base fundamental e as dimensões entre os novos parâmetros devem ser independentes. A base *LMT* do SI poderia ser substituída por uma nova base composta de três parâmetros derivados, desde que o determinante desta matriz seja diferente de zero.

3.2.2.2 Algoritmo para mudança de base

Para explicar o processo que efetua a mudança de base, Carneiro (1996) supõem o estudo de um fenômeno qualquer na base *LMT* no qual se deseja uma nova base composta pelas grandezas *A*, *B* e *C*. Deste modo, o valor da nova base na base fundamental é:

$$[A] = L^{a_L} M^{a_M} T^{a_T} \quad (3.1)$$

$$[B] = L^{b_L} M^{b_M} T^{b_T} \quad (3.2)$$

$$[C] = L^{c_L} M^{c_M} T^{c_T} \quad (3.3)$$

Assim, a matriz dimensional da nova base é da forma apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Matriz dimensional.

	L	M	T
A	a_L	a_M	a_T
B	b_L	b_M	b_T
C	c_L	c_M	c_T

(Fonte: Carneiro, 1996).

Tomando o logaritmo de todos os termos, tem-se um sistema de equações lineares:

$$\log[A] = \log(L^{a_L} M^{a_M} T^{a_T}) = a_L \log L + a_M \log M + a_T \log T \quad (3.4)$$

$$\log[B] = \log(L^{b_L} M^{b_M} T^{b_T}) = b_L \log L + b_M \log M + b_T \log T \quad (3.5)$$

$$\log[C] = \log(L^{c_L} M^{c_M} T^{c_T}) = c_L \log L + c_M \log M + c_T \log T \quad (3.6)$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log A \\ \log B \\ \log C \end{bmatrix}$$

Rearranjando os termos, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \log A \\ \log B \\ \log C \end{bmatrix}$$

Representando a matriz inversa pelos seguintes termos:

$$\begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} a_A & b_A & c_A \\ b_A & b_B & c_B \\ c_A & c_B & c_C \end{bmatrix}$$

Reescrevendo na forma polinomial, tem-se:

$$\log[L] = \log A^{a_A} + \log B^{a_B} + \log C^{a_C} = \log(A^{a_A} B^{a_B} C^{a_C}) \quad (3.7)$$

$$\log[M] = \log A^{b_A} + \log B^{b_B} + \log C^{b_C} = \log(A^{b_A} B^{b_B} C^{b_C}) \quad (3.8)$$

$$\log[T] = \log A^{c_A} + \log B^{c_B} + \log C^{c_C} = \log(A^{c_A} B^{c_B} C^{c_C}) \quad (3.9)$$

Os expoentes unidades fundamentais na nova base serão:

$$[L] = A^{a_A} B^{a_B} C^{a_C} \quad (3.10)$$

$$[M] = A^{b_A} B^{b_B} C^{b_C} \quad (3.11)$$

$$[T] = A^{c_A} B^{c_B} C^{c_C} \quad (3.12)$$

Assim, para que se conheçam os expoentes das grandezas fundamentais na nova base basta calcular a matriz inversa dos expoentes da nova base na base fundamental.

Conhecendo-se os expoentes da nova base, deve-se calcular os coeficientes das grandezas derivadas em relação à nova base. A dimensão de uma grandeza derivada é expressa pela equação (3.13).

$$[x] = L^\alpha M^\beta T^\gamma \quad (3.13)$$

onde α , β e γ são expoentes de uma grandeza derivada qualquer na base *LMT*.

Substituindo os valores de *L*, *M* e *T* das equações (3.10), (3.11) e (3.12) na equação (3.13), tem-se:

$$[x] = (A^{a_A} B^{a_B} C^{a_C})^\alpha (A^{b_A} B^{b_B} C^{b_C})^\beta (A^{c_A} B^{c_B} C^{c_C})^\gamma \quad (3.14)$$

$$[x] = A^{(\alpha a_A + \beta b_A + \gamma c_A)} B^{(\alpha a_B + \beta b_B + \gamma c_B)} C^{(\alpha a_C + \beta b_C + \gamma c_C)} \quad (3.15)$$

A aplicação da equação (3.15) permite calcular os expoentes de cada grandeza derivada na nova base. Assim, para que se tenha a matriz dimensional do problema na nova base, a equação (3.15) deve ser aplicada à todas as linhas da tabela de dimensional.

3.2.3 Semelhança e efeito de escala

Problemas em engenharia dificilmente são resolvidos aplicando-se exclusivamente análise teórica. Portanto, utilizam-se com freqüência estudos experimentais. Na experimentação por meio de modelos, a condição fundamental para que um ensaio modelo reproduza as condições de seu protótipo é a similaridade física. Assim, é necessário respeitar quatro tipos de semelhanças: geométrica, cinemática, dinâmica e constitutiva.

A semelhança geométrica entre o modelo e o protótipo é o fator que determina o fator de escala do modelo. A propriedade característica dos sistemas geometricamente semelhantes (modelo e protótipo) é que a razão entre qualquer comprimento no modelo e no protótipo é uma constante, sendo um requisito importante para que um modelo possa corresponder a um dado protótipo.

A semelhança cinemática é a semelhança do movimento, o que implica necessariamente semelhança de comprimentos (semelhança geométrica) e semelhança de intervalos de tempo. Já a semelhança dinâmica é a semelhança das forças. Dois sistemas são dinamicamente semelhantes quando os valores absolutos das forças, em pontos equivalentes dos dois sistemas, estão numa razão fixa.

A semelhança cinemática e dinâmica é obtida através da aplicação dos fatores de escala resultantes da mudança de base. A mudança de base possibilita analisar um problema em função das variáveis que determinam a sua resposta, portanto, a mudança de base está diretamente relacionada com as diferenças de escala entre modelo e protótipo.

A similaridade constitutiva é a similaridade de massas entre o ensaio modelo e protótipo. Estabelecida as condições de similaridade geométrica e cinemática, por conseqüência a similaridade constitutiva irá ocorrer. Ensaio modelo que respeitam todas as condições de similaridade apresentam semelhança física completa. Na experimentação, utilizando-se ensaios em escala, nem sempre é possível respeitar todas as condições de similaridade devido a fatores econômicos ou por dificuldade de execução. Quando uma ou mais grandezas que não atuam diretamente no fenômeno estudado desrespeitam a escala do problema diz-se que há semelhança física incompleta.

Segundo Carneiro (1996), conhecendo os fatores de escala das grandezas que constituem a nova base do ensaio modelo é possível obter a escala das diversas grandezas derivadas. Para

que se obtenha o fator de escala que deve ser aplicado à variável $[x]$ basta aplicar a seguinte equação:

$$ESC[x] = ESC(A)^{(\alpha_A + \beta b_C + \gamma c_A)} + ESC(B)^{(\alpha_A + \beta b_C + \gamma c_A)} + ESC(C)^{(\alpha_A + \beta b_C + \gamma c_A)} \quad (3.16)$$

A equação (3.16) deve ser aplicada a todas as grandezas de interesse para que se possa conhecer a dimensão de cada grandeza que satisfaça a semelhança entre o modelo e o protótipo.

3.3 ENSAIOS DINÂMICOS EM ESCALA – ENSAIO SPT

A seguir, será apresentada a análise dimensional realizada por Lobo (2007), com o objetivo de projetar os equipamentos necessários à simulação, respeitando as condições de similaridade entre o ensaio SPT e os ensaios modificados. As relações entre as áreas transversais do amostrador correspondem a 0,5, 1,5 e 2,0 vezes a área do amostrador SPT. Nesta seção será apresentada a representação geral para os ensaios, sendo que para a determinação dos fatores de escala para cada um deles, basta definir a escala de ensaio requerida de acordo com as relações entre as áreas transversais do amostrador.

3.3.1 Construção da matriz dimensional

A construção da matriz dimensional é realizada a partir da escolha das grandezas de interesse, que no caso da penetração dinâmica corresponde ao comprimento (L), massa (M) e tempo (T). A partir daí forma-se a base LMT e tem-se a matriz dimensional conforme observado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Matriz Dimensional para os ensaios SPT.

Grandezas Fundamentais	Símbolo	Unidade	Base Fundamental		
			L	M	T
Comprimento	l	m	1	0	0
Massa	m	kg	0	1	0
Tempo	t	s	0	0	1

(Fonte: Lobo, 2007).

3.3.2 Mudança de base

A mudança de base, conforme discutido anteriormente, é realizada para facilitar a análise e deve ser composta de grandezas que figurem diretamente nas relações funcionais de interesse. A nova base do problema tem o mesmo número de grandezas que a base fundamental e as dimensões entre os novos parâmetros devem ser independentes.

Neste caso, a base LMT do SI é substituída por uma nova base composta de três parâmetros derivados, que são a área da seção transversal A , massa específica γ e módulo de elasticidade E . Os componentes da nova base foram escolhidos pelo fato de ser possível controlá-los, ou seja, são grandezas que podem ser dimensionadas de acordo com as características específicas de cada ensaio.

De acordo com Lobo (2007) a grandeza seção transversal A foi inserida nesta análise objetivando inferir a escala do ensaio, relacionando as grandezas derivadas com a geometria do mesmo. A escolha da seção transversal como grandeza é de fundamental importância uma vez que se busca configurações de ensaios capazes de representar o ensaio de referência (ensaio SPT) a partir de modificações geométricas. Já a massa específica γ é a grandeza que vai relacionar a geometria do modelo com a sua massa, aliando as condições de similaridade geométrica e constitutiva. O módulo de elasticidade E é a grandeza que relaciona a similaridade cinemática com a geométrica.

A partir destas considerações tem-se a nova matriz dimensional que é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Matriz Dimensional para os ensaios SPT com as novas grandezas de base.

Grandezas de base	Símbolo	Unidade	Base Fundamental		
			L	M	T
Área	A	m^2	2	0	0
Massa específica	γ	kg/m^3	- 3	1	0
Módulo de elasticidade	E	Pa	- 1	1	- 2

(Fonte: Lobo, 2007).

A mudança de base é realizada através do resultado do cálculo do inverso da matriz da base fundamental da Tabela 3.4 e dimensiona os novos expoentes da nova base que está escrita na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Matriz Dimensional para os ensaios SPT com a nova base.

Grandezas de base	Símbolo	Unidade	Base Fundamental			Nova Base		
			<i>L</i>	<i>M</i>	<i>T</i>	Inversão		
Área	<i>A</i>	m ²	2	0	0	0,5	0	0
Massa específica	γ	kg/m ³	3	1	0	1,5	1	0
Módulo de elasticidade	<i>E</i>	Pa	1	1	-2	0,5	0,5	-0,5

(Fonte: Lobo, 2007).

Portanto, o inverso da matriz acima (Base Fundamental) dimensiona os novos expoentes da nova base, a partir das quais determinam-se os coeficientes das grandezas derivadas em relação à nova base. A dimensão de uma grandeza derivada é expressa pela equação (3.13), descrita anteriormente.

A mudança de base foi realizada por Lobo (2007) através de planilha eletrônica programada em *Microsoft Excel*. Os cálculos relacionados com a mudança de base foram detalhadamente discutidos e deduzidos no trabalho do referido autor citado acima.

A matriz dimensional representativa das unidades envolvidas na análise dimensional é apresentada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Matriz dimensional das unidades envolvidas nos ensaios SPT.

Grandezas derivadas	Símbolo	Unidade	L	M	T	A	γ	E
Comprimento	l	M	1	0	0	0,5	0	0
Massa	M	Kg	0	1	0	1,5	1	0
Tempo	T	S	0	0	1	0,5	0,5	-0,5
Aceleração	A	m/s ²	1	0	-2	-0,5	-1	1
Velocidade	V	m/s	1	0	-1	0	-0,5	0,5
Força	F	N	1	1	-2	1	0	1
Módulo de elasticidade	\mathcal{E}	Pa	-1	1	-2	0	0	1
Módulo de corte	\mathcal{G}	Pa	-1	1	-2	0	0	1
Coefficiente de Poisson	ν	-	0	0	0	0	0	0
Quake	Q	m	1	0	0	0,5	0	0
Coef. de carregamento dinâmico	ϑ	s/m	-1	0	1	0	0,5	-0,5
Coef. de amortecimento	\mathcal{X}	Kg/s	0	1	-1	1	0,5	0,5
Impulso	I	N.s	1	1	-1	1,5	0,5	0,5
Tensão	σ	Pa	-1	1	-2	0	0	1
Massa específica	γ	Kg/m ³	-3	1	0	-2E-16	1	0
Massa por comprimento	μ	kg/m	-1	1	0	1	1	0
Peso específico	ρ	N/m ³	-2	1	-2	-0,5	0	1
Inércia de massa	I	kgm ²	2	1	0	2,5	1	0
Inércia por comprimento	I	kgm	1	1	0	2	1	0
Rigidez	\mathcal{K}	N/m	0	1	-2	0,5	0	1
Rigidez axial	$\mathcal{E}\mathcal{A}/L$	N/m	0	1	-2	0,5	0	1
Rigidez a flexão	$\mathcal{E}I/L^3$	N/m	0	1	-2	0,5	0	1
Energia	\mathcal{E}^o	J	2	1	-2	1,5	0	1
Área	\mathcal{A}	m ²	2	0	0	1	0	0
Volume	\mathcal{V}	m ³	3	0	0	1,5	0	0
Módulo resistente	\mathcal{W}	m ³	3	0	0	1,5	0	0
Inércia de área	I	m ⁴	4	0	0	2	0	0

(Fonte: Lobo, 2007).

Tendo a matriz dimensional completamente definida e seus expoentes de dimensão na nova base determinados é possível inferir a esta análise fatores de escala com o objetivo de determinar configurações de ensaios similares.

Para obter tais condições de similaridade é necessário estabelecer a escala das grandezas de base. Para a condição específica de um equipamento 2,0 SPT tem-se que a escala de área A é 2, a da massa específica γ é 1 e a do módulo de elasticidade E também 1. Estas grandezas de base são controladas e determinam os demais fatores de escala do problema, cujas grandezas derivadas na análise dimensional são calculadas através da equação (3.16).

Tabela 3.7: Fatores de escala da análise dimensional para o ensaio 2,0 SPT.

Grandezas de base	Símbolo	Unidade	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>T</i>	Inversão			Escala
Área	\mathcal{A}	m ²	2	0	0	0,5	0	0	2,000E+00
Massa específica	γ	kg/m ³	-3	1	0	1,5	1	0	1,000E+00
Módulo de elasticidade	\mathcal{E}	Pa	-1	1	-2	0,5	0,5	-0,5	1,000E+00

Grandezas derivadas	Símbolo	Unidade	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>T</i>	<i>A</i>	γ	<i>E</i>	Escala
Comprimento	l	m	1	0	0	0,5	0	0	1,414E+00
Massa	m	kg	0	1	0	1,5	1	0	2,828E+00
Tempo	t	s	0	0	1	0,5	0,5	-0,5	1,414E+00
Aceleração	\mathcal{A}	m/s ²	1	0	-2	-0,5	-1	1	7,071E-01
Velocidade	v	m/s	1	0	-1	0	-0,5	0,5	1,000E+00
Força	\mathcal{F}	N	1	1	-2	1	0	1	2,000E+00
Módulo de elasticidade	\mathcal{E}	Pa	-1	1	-2	0	0	1	1,000E+00
Módulo de corte	\mathcal{G}	Pa	-1	1	-2	0	0	1	1,000E+00
Coeficiente de Poisson	ν	-	0	0	0	0	0	0	1,000E+00
Quake	Q	m	1	0	0	0,5	0	0	1,414E+00
Coef. carregamento dinâmico	ϑ	s/m	-1	0	1	0	0,5	-0,5	1,000E+00
Coef. de amortecimento	X	kg/s	0	1	-1	1	0,5	0,5	2,000E+00
Impulso	I	N.s	1	1	-1	1,5	0,5	0,5	2,828E+00
Tensão	σ	Pa	-1	1	-2	0	0	1	1,000E+00
Massa específica	γ	kg/m ³	-3	1	0	-2E-16	1	0	1,000E+00
Massa por comprimento	μ	kg/m	-1	1	0	1	1	0	2,000E+00
Peso específico	ρ	N/m ³	-2	1	-2	-0,5	0	1	7,071E-01
Inércia de massa	I	Kgm ²	2	1	0	2,5	1	0	5,657E+00
Inércia por comprimento	i	kgm	1	1	0	2	1	0	4,000E+00
Rigidez	\mathcal{K}	N/m	0	1	-2	0,5	0	1	1,414E+00
Rigidez axial	$\mathcal{E}\mathcal{A}/L$	N/m	0	1	-2	0,5	0	1	1,414E+00
Rigidez a flexão	$\mathcal{E}I/L^3$	N/m	0	1	-2	0,5	0	1	1,414E+00
Energia	\mathcal{E}^o	J	2	1	-2	1,5	0	1	2,828E+00
Área	\mathcal{A}	m ²	2	0	0	1	0	0	2,000E+00
Volume	\mathcal{V}	m ³	3	0	0	1,5	0	0	2,828E+00
Módulo resistente	\mathcal{W}	m ³	3	0	0	1,5	0	0	2,828E+00
Inércia de área	I	m ⁴	4	0	0	2	0	0	4,000E+00

(Fonte: Lobo, 2007).

A dimensão de cada grandeza que satisfaz a semelhança entre o modelo e o protótipo requerido é apresentada na Tabela 3.7. De maneira análoga, é possível criar os fatores de escala correspondentes aos ensaios 1,5 SPT e 0,5 SPT, apresentados nas Tabelas 3.8 e 3.9.

Tabela 3.8: Fatores de escala da análise dimensional para o ensaio 1,5 SPT.

Grandezas de base	Símbolo	Unidade	L	M	T	Inversão			Escala
Área	\mathcal{A}	m ²	2	0	0	0,5	0	0	1,500E+00
Massa específica	γ	kg/m ³	-3	1	0	1,5	1	0	1,000E+00
Módulo de elasticidade	\mathcal{E}	Pa	-1	1	-2	0,5	0,5	-0,5	1,000E+00
Grandezas derivadas	Símbolo	Unidade	L	M	T	A	γ	E	Escala
Comprimento	l	m	1	0	0	0,5	0	0	1,225E+00
Massa	m	kg	0	1	0	1,5	1	0	1,837E+00
Tempo	t	s	0	0	1	0,5	0,5	-0,5	1,225E+00
Aceleração	a	m/s ²	1	0	-2	-0,5	-1	1	8,165E-01
Velocidade	v	m/s	1	0	-1	0	-0,5	0,5	1,000E+00
Força	\mathcal{F}	N	1	1	-2	1	0	1	1,500E+00
Módulo de elasticidade	\mathcal{E}	Pa	-1	1	-2	0	0	1	1,000E+00
Módulo de corte	\mathcal{G}	Pa	-1	1	-2	0	0	1	1,000E+00
Coeficiente de Poisson	ν	-	0	0	0	0	0	0	1,000E+00
Quake	Q	m	1	0	0	0,5	0	0	1,225E+00
Coef. carregamento dinâmico	ϑ	s/m	-1	0	1	0	0,5	-0,5	1,000E+00
Coef. de amortecimento	X	kg/s	0	1	-1	1	0,5	0,5	1,500E+00
Impulso	I	N.s	1	1	-1	1,5	0,5	0,5	1,837E+00
Tensão	σ	Pa	-1	1	-2	0	0	1	1,000E+00
Massa específica	γ	kg/m ³	-3	1	0	-2E-16	1	0	1,000E+00
Massa por comprimento	μ	kg/m	-1	1	0	1	1	0	1,500E+00
Peso específico	ρ	N/m ³	-2	1	-2	-0,5	0	1	8,165E-01
Inércia de massa	I	kgm ²	2	1	0	2,5	1	0	2,756E+00
Inércia por comprimento	i	kgm	1	1	0	2	1	0	2,250E+00
Rigidez	\hat{k}	N/m	0	1	-2	0,5	0	1	1,225E+00
Rigidez axial	$\mathcal{E}\mathcal{A}/L$	N/m	0	1	-2	0,5	0	1	1,225E+00
Rigidez a flexão	$\mathcal{E}I/L^3$	N/m	0	1	-2	0,5	0	1	1,225E+00
Energia	\mathcal{E}^o	J	2	1	-2	1,5	0	1	1,837E+00
Área	\mathcal{A}	m ²	2	0	0	1	0	0	1,500E+00
Volume	\mathcal{V}	m ³	3	0	0	1,5	0	0	1,837E+00
Módulo resistente	\mathcal{W}	m ³	3	0	0	1,5	0	0	1,837E+00
Inércia de área	I	m ⁴	4	0	0	2	0	0	2,250E+00

(Fonte: Lobo, 2007).

Tabela 3.9: Fatores de escala da análise dimensional para o ensaio 0,5 SPT.

Grandezas de base	Símbolo	Unidade	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>T</i>	Inversão			Escala
Área	\mathcal{A}	m ²	2	0	0	0,5	0	0	5,000E-01
Massa específica	γ	kg/m ³	-3	1	0	1,5	1	0	1,000E+00
Módulo de elasticidade	\mathcal{E}	Pa	-1	1	-2	0,5	0,5	-0,5	1,000E+00

Grandezas derivadas	Símbolo	Unidade	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>T</i>	<i>A</i>	γ	<i>E</i>	Escala
Comprimento	l	m	1	0	0	0,5	0	0	7,071E-01
Massa	m	kg	0	1	0	1,5	1	0	3,536E-01
Tempo	t	s	0	0	1	0,5	0,5	-0,5	7,071E-01
Aceleração	a	m/s ²	1	0	-2	-0,5	-1	1	1,414E+00
Velocidade	v	m/s	1	0	-1	0	-0,5	0,5	1,000E+00
Força	\mathcal{F}	N	1	1	-2	1	0	1	5,000E-01
Módulo de elasticidade	\mathcal{E}	Pa	-1	1	-2	0	0	1	1,000E+00
Módulo de corte	\mathcal{G}	Pa	-1	1	-2	0	0	1	1,000E+00
Coeficiente de Poisson	ν	-	0	0	0	0	0	0	1,000E+00
Quake	Q	m	1	0	0	0,5	0	0	7,071E-01
Coef. carregamento dinâmico	ϑ	s/m	-1	0	1	0	0,5	-0,5	1,000E+00
Coef. de amortecimento	X	kg/s	0	1	-1	1	0,5	0,5	5,000E-01
Impulso	I	N.s	1	1	-1	1,5	0,5	0,5	3,536E-01
Tensão	σ	Pa	-1	1	-2	0	0	1	1,000E+00
Massa específica	γ	kg/m ³	-3	1	0	-2E-16	1	0	1,000E+00
Massa por comprimento	μ	kg/m	-1	1	0	1	1	0	5,000E-01
Peso específico	ρ	N/m ³	-2	1	-2	-0,5	0	1	1,414E+00
Inércia de massa	I	kgm ²	2	1	0	2,5	1	0	1,768E-01
Inércia por comprimento	i	kgm	1	1	0	2	1	0	2,500E-01
Rigidez	\hat{k}	N/m	0	1	-2	0,5	0	1	7,071E-01
Rigidez axial	$\mathcal{E}\mathcal{A}/L$	N/m	0	1	-2	0,5	0	1	7,071E-01
Rigidez a flexão	$\mathcal{E}I/L^3$	N/m	0	1	-2	0,5	0	1	7,071E-01
Energia	\mathcal{E}^o	J	2	1	2	1,5	0	1	3,536E-01
Área	\mathcal{A}	m ²	2	0	0	1	0	0	5,000E-01
Volume	\mathcal{V}	m ³	3	0	0	1,5	0	0	3,536E-01
Módulo resistente	\mathcal{W}	m ³	3	0	0	1,5	0	0	3,536E-01
Inércia de área	I	m ⁴	4	0	0	2	0	0	2,500E-01

(Fonte: Lobo, 2007).

Observando as Tabelas 3.7, 3.8 e 3.9, verifica-se, por exemplo, que os fatores de escala de área e força são idênticos, levando ao valor unitário de tensão. A escala da massa específica e do módulo de elasticidade também é unitária, o que significa que o material utilizado na confecção dos equipamentos de ensaio é o mesmo para todos os casos. Outro fator de escala que deve ser observado refere-se ao comprimento que, para todos os casos, é a raiz quadrada da escala de área, enquanto a massa e a energia têm o mesmo fator de escala pelo fato de possuírem grandezas derivadas com mesmo coeficiente. Já a aceleração da gravidade, um parâmetro que não pode ser controlado experimentalmente nos modelos de ensaio propostos, apresenta valores diferentes para cada dimensão de equipamento.

3.4 DIMENSIONAMENTO DOS ENSAIOS DINÂMICOS MODIFICADOS

O dimensionamento dos ensaios dinâmicos modificados é realizado a partir dos fatores de escala calculados para cada grandeza inserida na análise dimensional, de cada um dos ensaios. Para determinar as dimensões de cada componente do ensaio segundo os fatores de escala calculados nas Tabelas 3.7, 3.8 e 3.9 multiplica-se cada fator às dimensões correspondentes do ensaio SPT. A Tabela 3.10 mostra os componentes do ensaio, martelo, haste e amostrador, com as respectivas dimensões em escala.

Tabela 3.10: Dimensionamento dos ensaios dinâmicos.

Análise de Escala					
Componente	Dimensão	0,5 SPT	SPT	1,5 SPT	2,0 SPT
Martelo	Diâmetro (mm) =	162,63	230,00	281,75	325,22
	Altura (mm) =	162,63	230,00	281,75	325,22
	Massa (kg) =	22,98	65,00	119,41	183,82
	Altura de queda (m) =	0,53	0,75	0,92	1,06
Haste	Diâmetro (mm) =	16,26	23,00	28,17	32,52
	Área (mm ²) =	207,60	415,50	623,20	830,60
Amostrador	Diâmetro externo (mm) =	35,92	50,80	62,23	71,83
	Diâmetro interno (mm) =	24,68	34,90	42,88	49,35
	Altura (mm) =	558,61	790,00	967,55	1117,23

Observando a Tabela 3.10 percebe-se que a massa do martelo utilizado no ensaio 2,0 SPT, em escala, apresenta valor elevado, o que torna o ensaio inviável ou de difícil execução. Para contornar as dificuldades operacionais do martelo, optou-se por utilizar um martelo de 120 kg (próximo ao ensaio 1,5 SPT) nos ensaios 1,5 SPT e 2,0 SPT, realizando-se uma compensação na massa através da mudança na altura de queda do martelo com o objetivo de manter a energia de referência nos respectivos ensaios, calculada através da equação (3.17). Já para os demais ensaios permaneceram os martelos de 23 kg (ensaio 0,5 SPT) e o martelo de 65 kg (1,0 SPT).

$$E = M_m gh \quad (3.17)$$

onde: E = energia potencial gravitacional;

M_m = massa do martelo;

g = aceleração da gravidade;

h = altura de queda do martelo.

As novas dimensões do martelo e altura de queda estão demonstradas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Dimensionamento do martelo.

Componente	Dimensão	0,5 SPT	SPT	1,5 SPT	2,0 SPT
Martelo	Diâmetro (mm) =	162,63	230,00	281,75	281,75
	Altura (mm) =	162,63	230,00	281,75	281,75
	Massa (kg) =	23,00	65,00	120,00	120,00
	Altura de queda (m) =	0,50	0,75	0,75	1,15

O programa experimental foi concebido de forma a possibilitar a comparação entre os diferentes ensaios testados a mesmas profundidades (Z). Seleccionadas as profundidades 5 m, 11 m e 17 m calculou-se os comprimentos de hastes necessários para efetuar os ensaios em escala, tendo como referência hastes de 6 m, 12 m e 18 m, que neste trabalho são utilizadas no ensaio 1,0 SPT. A Tabela 3.12 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3.12: Dimensionamento das hastes.

SPT	ϕ da haste (mm)	Fator de escala	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Volume da haste (m ³)
0,5	16,26	0,707	5,00	4,24	0,000881
			11,00	8,48	0,001763
			17,00	12,73	0,002644
1,0	23,00	1,000	5,00	6,00	0,002493
			11,00	12,00	0,004986
			17,00	18,00	0,007479
1,5	28,16	1,225	5,00	7,35	0,004550
			11,00	14,70	0,009159
			17,00	22,04	0,013739
2,0	32,52	1,414	5,00	8,48	0,007051
			11,00	16,97	0,014102
			17,00	25,45	0,021153

Analisando a Tabela 3.12 nota-se que alguns comprimentos de hastes, uma vez em escala, não ficam de acordo com as profundidades de ensaio, ou seja, em alguns casos as hastes não chegam à superfície do terreno e em outros o comprimento vai além da profundidade de ensaio. Uma compensação no comprimento da haste e no respectivo diâmetro, por meio de

uma relação de volume, calculada através da equação (3.18), resulta em configurações atualizadas, apresentadas na Tabela 3.13.

$$V = \frac{\pi d^2}{4} L \quad (3.18)$$

onde: V = volume da haste;

d = diâmetro da haste;

L = comprimento da haste.

Tabela 3.13: Dimensionamento das hastes com novo diâmetro.

SPT	ϕ da haste (mm)	Novo ϕ da haste (mm)	Fator de escala	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Volume da haste (m ³)	Novo comprimento da haste (m)	Novo Volume da haste (m ³)
0,5	16,26	14,00	0,707	5,00	4,24	0,000881	5,72	0,000881
				11,00	8,48	0,001763	11,45	0,001763
				17,00	12,73	0,002644	17,18	0,002644
1,0	23,00	23,00	1,000	5,00	6,00	0,002493	6,00	0,002493
				11,00	12,00	0,004986	12,00	0,004986
				17,00	18,00	0,007479	18,00	0,007479
1,5	28,16	32,00	1,225	5,00	7,35	0,004550	5,69	0,004550
				11,00	14,70	0,009159	11,39	0,009159
				17,00	22,04	0,013739	17,08	0,013739
2,0	32,52	40,00	1,414	5,00	8,48	0,007051	5,61	0,007051
				11,00	16,97	0,014102	11,22	0,014102
				17,00	25,45	0,021153	16,83	0,021153

As dimensões mostradas na Tabela 3.13 devem ser somadas ao comprimento dos respectivos amostradores, chegando-se a configuração final dos ensaios descrita na Tabela 3.14.

Tabela 3.14: Comprimento total do sistema haste com novo diâmetro mais amostrador.

SPT	Novo ϕ da haste (mm)	Z (m)	Novo Comprimento da haste (m)	Novo Volume da haste (m ³)	Altura do Amostrador (mm)	Comprimento total (m)
0,5	14	5,00	5,72	0,000881	558,61	6,28
		11,00	11,45	0,001763		12,01
		17,00	17,18	0,002644		17,74
1,0	23	5,00	6,00	0,002493	790,00	6,79
		11,00	12,00	0,004986		12,79
		17,00	18,00	0,007479		18,79
1,5	32	5,00	5,69	0,004550	967,55	6,66
		11,00	11,39	0,009159		12,36
		17,00	17,08	0,013739		18,05
2,0	40	5,00	5,61	0,007051	1117,23	6,73
		11,00	11,22	0,014102		12,34
		17,00	16,83	0,021153		17,95

A Tabela 3.15 apresenta de forma resumida a configuração dos ensaios propostos que são realizados na presente pesquisa.

Tabela 3.15: Configuração do ensaio SPT e dos ensaios SPT modificados.

SPT	Z (m)	Martelo		Haste		Amostrador		
		Massa (kg)	Altura de queda (m)	ϕ (mm)	Comprimento (m)	ϕ externo (mm)	ϕ interno (mm)	Altura (mm)
0,5	5,00	23	0,50	14	5,72	35,92	24,68	558,61
	11,00				11,45			
	17,00				17,18			
1,0	5,00	65	0,75	23	6,00	50,80	34,90	790,00
	11,00				12,00			
	17,00				18,00			
1,5	5,00	120	0,75	32	5,69	62,23	42,75	967,55
	11,00				11,39			
	17,00				17,08			
2,0	5,00	120	1,15	40	5,61	71,83	49,35	1117,23
	11,00				11,22			
	17,00				16,83			

Observando a Tabela 3.15, percebe-se que os ensaios dimensionados apresentam possibilidade de execução, visto que o comprimento do conjunto haste-amostrador é sempre maior que a profundidade de ensaio.

3.5 DESENVOLVIMENTO DOS EQUIPAMENTOS

3.5.1 Equipamentos de penetração dinâmica

Após projetar os ensaios, os mesmos foram usinados de acordo com as dimensões estabelecidas. Verificado o material disponível no mercado, de acordo com as dimensões solicitadas através do dimensionamento dos ensaios, têm-se as novas dimensões dos materiais que serão empregados na fabricação dos equipamentos. A escolha desses materiais foi realizada através da análise de catálogos de empresas conceituadas que disponibilizam tubos e tarugos de aço. A Tabela 3.16 apresenta as novas dimensões dos componentes destess equipamentos.

Tabela 3.16: Dimensionamento dos ensaios dinâmicos modificados.

Análise de Escala					
Componente	Dimensão	0,5 SPT	SPT	1,5 SPT	2,0 SPT
Martelo	Diâmetro (mm) =	160,00	230,00	270,00	270,00
	Altura (mm) =	160,00	230,00	270,00	270,00
	Massa (kg) =	23,00	65,00	120,00	120,00
	Altura de queda (m) =	0,50	0,75	0,75	1,15
Hastes	Diâmetro (mm) =	14,00	23,00	32,00	40,00
	Área (mm ²) =	153,94	415,50	804,25	1256,64
Amostrador	Diâmetro externo (mm) =	36,00	50,80	60,30	73,00
	Diâmetro interno (mm) =	25,00	34,90	38,16	53,94
	Altura (mm) =	558,61	790,00	967,55	1117,23

O martelo de 65 kg é o mesmo utilizado no ensaio denominado 1,0 SPT. Já os martelos de 23 kg e de 120 kg foram dimensionados de acordo com os fatores de escala dos ensaios 0,5 SPT e 1,5 SPT, respectivamente, e sua geometria determinada de maneira que possuísse a massa requerida.

Para a fabricação dos martelos de 23 kg e 120 kg, optou-se por um formato cilíndrico obtido por meio de um tarugo de aço e coxim de madeira. O pino-guia e a cabeça de bater foram confeccionados por meio de um tarugo de aço. A Tabela 3.17 apresenta as dimensões dos martelos, bem como do pino-guia e cabeça de bater para cada um deles.

Tabela 3.17: Martelos de 23 kg, 65 kg e 120 kg e seus componentes.

Componente	Dimensão	23 kg	65 kg	120 kg
Martelo	Diâmetro (mm) =	160,00	230,00	270,00
	Altura (mm) =	160,00	230,00	270,00
Pino-guia	Diâmetro (mm) =	8,00	22,20	14,00
	Comprimento (mm) =	700,00	1200,00	1400,00
Cabeça de bater	Diâmetro (mm) =	60,00	90,00	102,00
	Altura (mm) =	65,00	100,00	110,00

Na Figura 3.1, 3.2 e 3.3, pode-se visualizar o projeto dos referidos materiais bem como o coxim de madeira, com suas respectivas dimensões para o martelo de 23 kg, 65 kg e 120 kg, respectivamente.

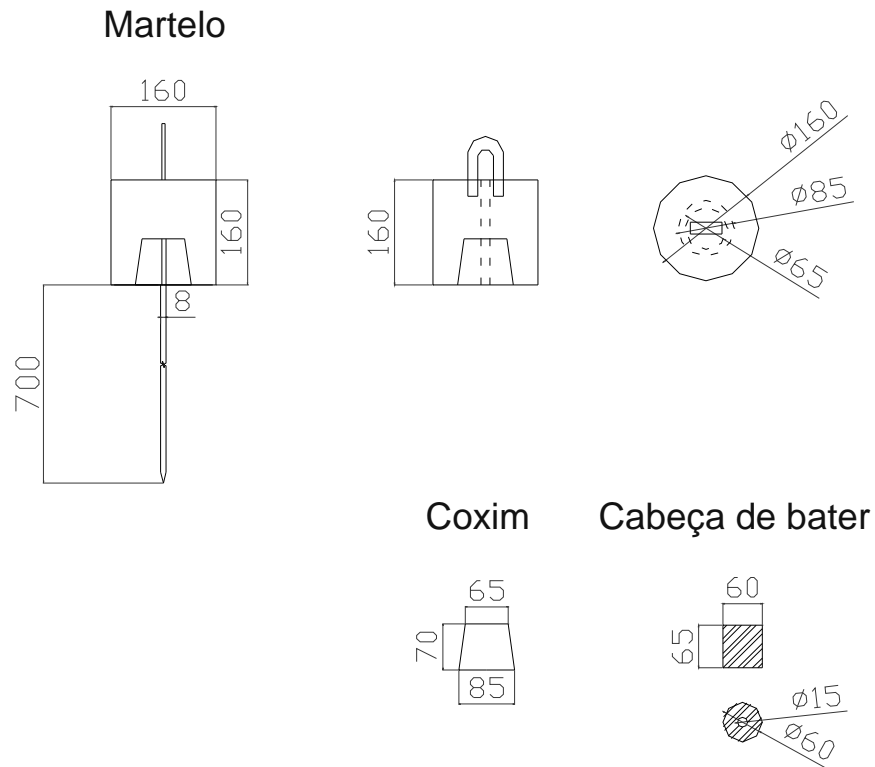


Figura 3.1: Martelo de 23 kg e seus respectivos componentes (medidas em mm).

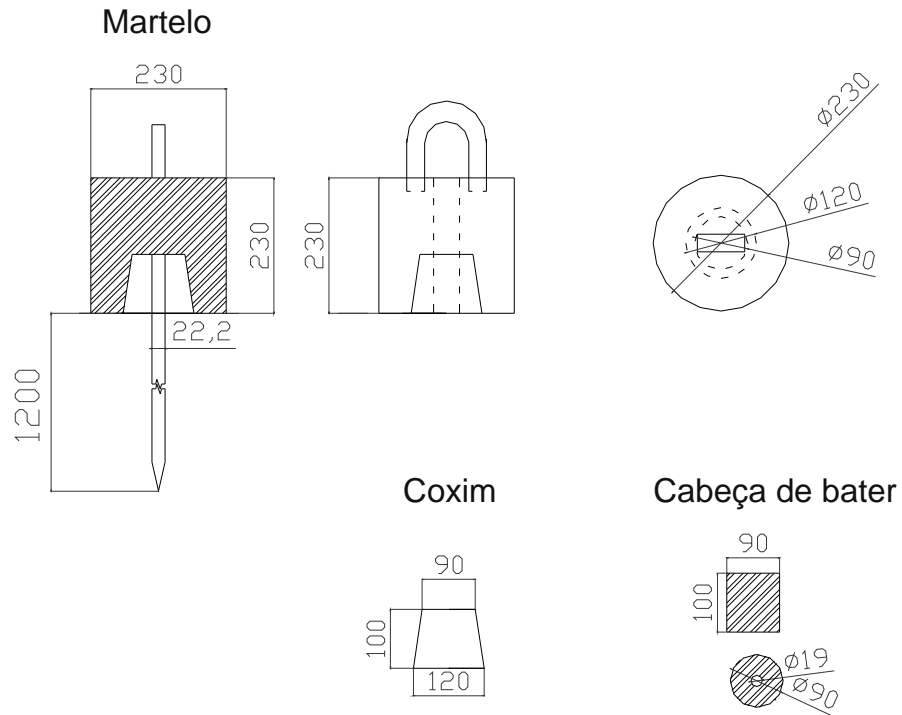


Figura 3.2: Martelo de 65 kg e seus respectivos componentes (medidas em mm).

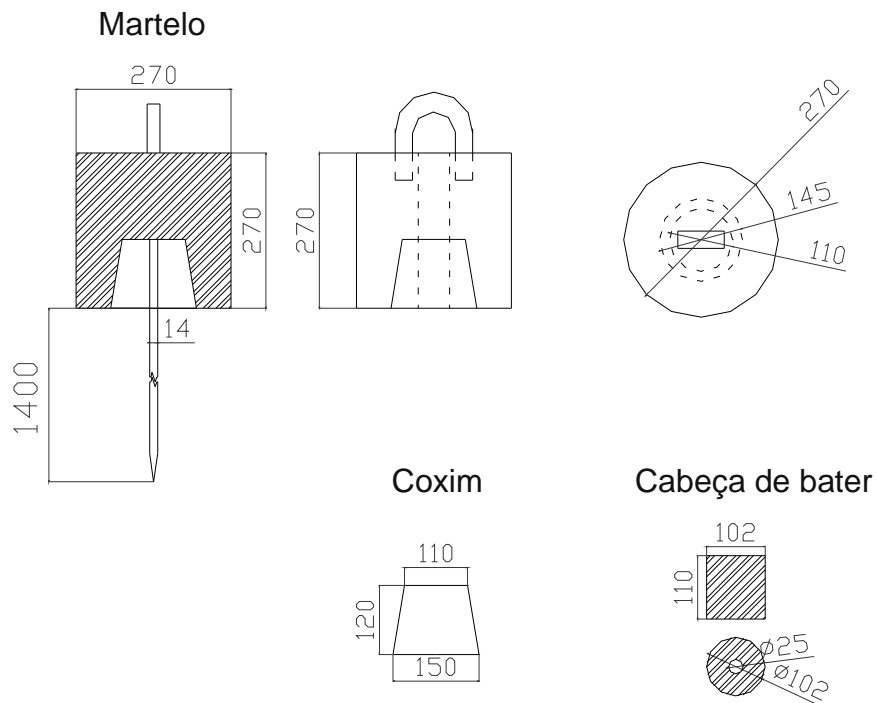


Figura 3.3: Martelo de 120 kg e seus respectivos componentes (medidas em mm).

Nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 tem-se, respectivamente, o martelo de 23 kg, 65 kg e 120 kg, com detalhe para o coxim de madeira. Já na Figura 3.7 visualiza-se a cabeça de bater para o martelo de 23 kg e 120 kg, já usinadas.



(a) martelo de 23 kg.



(b) detalhe do coxim de madeira.

Figura 3.4: Martelo de 23 kg.



(a) martelo de 65 kg.



(b) detalhe do coxim de madeira.

Figura 3.5: Martelo de 65 kg.



(a) martelo de 120 kg.



(b) detalhe do coxim de madeira.

Figura 3.6: Martelo de 120 kg.



Figura 3.7: Cabeça de bater utilizada para os ensaios com o martelo de 23 kg e 120 kg, respectivamente.

As hastes dos ensaios modificados foram adquiridas de acordo com o seu peso (kg/m), calculado através da equação (3.19).

$$P = \frac{\pi d^2}{4} \rho_{aço} \quad (3.19)$$

onde: P = peso da haste;

d = diâmetro da haste;

$\rho_{aço}$ = peso específico do aço (7850 kg/m^3).

Calculado o peso da haste, verificou-se as hastes disponíveis no mercado que possuíssem o peso mais próximo do necessário. Para o ensaio 0,5 SPT e 2,0 SPT foi necessário adquirir o material para a confecção das hastes. Já para a haste do ensaio 1,5 SPT, optou-se por utilizar a haste do ensaio de cone por apresentar características similares ao ensaio requerido. A Tabela 3.18 mostra as dimensões das hastes utilizadas nos ensaios.

Tabela 3.18: Dimensões das hastes utilizadas nos ensaios SPT

SPT	Z (m)	Haste			
		ϕ externo (mm)	ϕ interno (mm)	Peso (kg/m)	Comprimento (m)
0,50	5,00	17,10	10,70	1,10	6,31
	11,00				12,61
	17,00				18,92
1,00	5,00	33,40	24,30	3,24	6,04
	11,00				12,09
	17,00				18,13
1,50	5,00	36,00	16,00	6,60	5,61
	11,00				11,21
	17,00				16,82
2,00	5,00	50,00	32,00	9,56	6,08
	11,00				12,16
	17,00				18,25

A Figura 3.8 mostra o projeto das hastes usinadas, as quais foram utilizadas nos ensaios 0,5 SPT e 2,0 SPT.

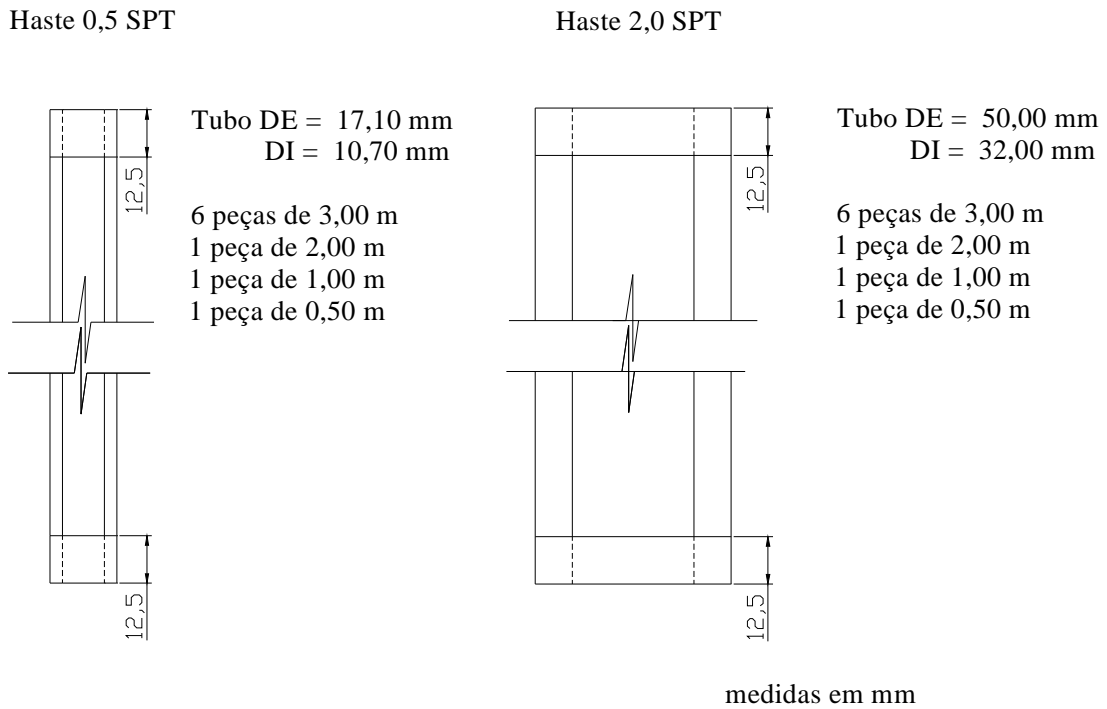


Figura 3.8: Hastes dos ensaios 0,5 SPT e 2,0 SPT.

As luvas foram dimensionadas de maneira que permitisse a perfeita ligação entre as hastes. Para a haste do ensaio 0,5 SPT optou-se por uma luva 3/8" com altura de 3 cm e diâmetro de 2,3 cm. A haste utilizada no ensaio 2,0 SPT necessitou de uma luva maior, que não encontrou-se disponível no mercado, sendo assim foi usinada através da utilização de um tubo de aço com 6 mm de espessura de parede e apresentou altura de 6 cm e diâmetro também de 6 cm.

Na Figura 3.9 tem-se a visualização das hastes e luvas já usinadas. Na parte superior da foto a hastes utilizada no ensaio 2,0 SPT e na inferior a haste para o ensaio 0,5 SPT.



Figura 3.9: Hastes usinadas.

Para os amostradores, optou-se em escolher tubos com os diâmetros e espessuras de parede mais próximos do requerido em projeto para assim facilitar a usinagem dos mesmos. O desenvolvimento dos amostradores foi realizado pensando na necessidade de executar ensaios que simulem condições reais em campo. Para isso, foram realizados ensaios SPT nas condições onde os amostradores simulem situações ocorrendo penetração sem embuchamento, ponta aberta, e também quando ocorre penetração com o amostrador embuchado, ponta fechada. Para permitir estas situações, optou-se em fabricar sapatas cortantes com a ponta aberta, conforme o ensaio SPT, e ponta fechada, por meio de um tarugo de aço com ponta cônica, como pode ser observado na Figura 3.10, a qual ilustra os amostradores dos ensaios dinâmicos modificados.

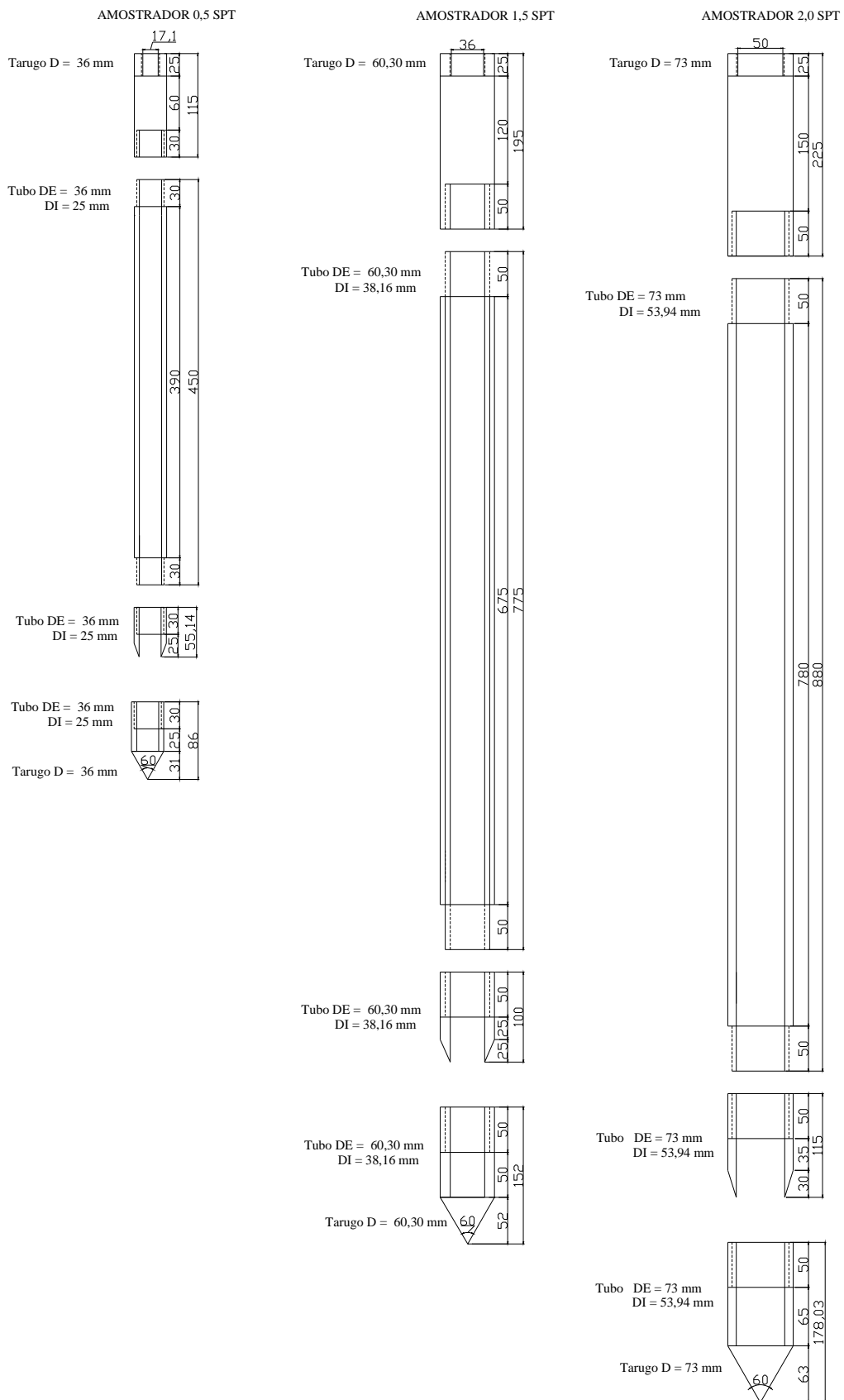


Figura 3.10: Amostradores utilizados nos ensaios dinâmicos modificados.

Como pode ser verificado na Figura 3.10, optou-se em não confeccionar amostradores bipartidos porque não serão coletadas amostras de solo. Para o ensaio 1,0 SPT utilizou-se o amostrador descrito em norma e para a situação de embuchamento (ponta fechada) utilizou-se de um tarugo de aço com ponta cônica, usinado da mesma forma que os amostradores modificados.

A Figura 3.11 ilustra a cabeça, o corpo e a sapata cortante dos amostradores já usados. Nas Figuras 3.12 e 3.13 têm-se, respectivamente, a visualização detalhada da sapata cortante com a ponta aberta e a sapata com a ponta fechada.



Figura 3.11: Cabeça, corpo e sapata cortante dos amostradores.



(a) sapatas cortantes.



(b) detalhes das sapatas cortantes com ponta aberta.

Figura 3.12: Sapatas cortantes com ponta aberta.



Figura 3.13: Sapatas cortantes com ponta fechada.

Após definido todos os materiais, analisou-se a possibilidade real de realização dos ensaios e por questões práticas de usinagem e utilização dos equipamentos efetuou-se alguns arredondamentos, para mais ou para menos, no comprimento final das hastes e mostradores.

A Tabela 3.19 apresenta a configuração final das dimensões dos materiais para efetuar a usinagem dos equipamentos, bem como a configuração final dos referidos ensaios.

Tabela 3.19: Configuração final dos ensaios dinâmicos modificados.

SPT	Z (m)	Martelo		Haste				Amostrador		
		Massa (kg)	Altura de queda (m)	ϕ externo (mm)	ϕ interno (mm)	Peso (kg/m)	Comprimento (m)	ϕ externo (mm)	ϕ interno (mm)	Altura (mm)
0,50	5,00	23	0,50	17,10	10,70	1,10	6,50	36,00	25,00	560,00
	11,00						12,50			
	17,00						19,00			
1,00	5,00	65	0,75	33,40	24,30	3,24	6,00	50,80	34,90	790,00
	11,00						12,00			
	17,00						18,00			
1,50	5,00	120	0,75	36,00	16,00	6,60	5,50	61,30	38,16	970,00
	11,00						11,00			
	17,00						17,00			
2,00	5,00	120	1,15	50,00	32,00	9,56	6,00	73,00	53,94	1120,00
	11,00						12,00			
	17,00						18,00			

Com o dimensionamento dos ensaios dinâmicos modificados é possível a realização de uma simulação numérica que será apresentada no próximo capítulo e também a realização dos ensaios experimentais em campo.

3.6 COMENTÁRIOS FINAIS

Com base na análise dimensional foi possível dimensionar os equipamentos de penetração dinâmica dentro dos princípios de escala e similaridade. A usinagem dos equipamentos, como pode ser observada, dependeu do material disponível no mercado, sendo assim os equipamentos foram adaptados de acordo com a necessidade requerida, sempre favorecendo dentro do possível os fatores de escala.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a simulação numérica dos ensaios de penetração dinâmica projetados em diferentes escalas e estudados na presente pesquisa. Para tanto, os ensaios dimensionados foram submetidos a uma análise através de um programa numérico desenvolvido por Lobo *et al* (2007) a partir de programas pré-existentes de Rocha (1989) e Odebrecht (2003), onde a linguagem de programação utilizada é *Matlab 6.5*.

Esta análise numérica tem como objetivo verificar as condições de similaridade entre os ensaios dinâmicos idealizados e executados. Os ensaios denominados ensaios dinâmicos idealizados são aqueles que têm todos os seus componentes em escala e apresentam condições de similaridade completa. Já os ensaios dinâmicos executáveis, conforme demonstrado no Capítulo 3, apresentam similaridade incompleta.

4.2 PROGRAMA NUMÉRICO

O programa numérico proposto por Lobo *et al* (2007) foi desenvolvido para simular numericamente ensaios dinâmicos a partir de características básicas do ensaio (geometria) e de propriedades do solo como ângulo de atrito, tensão efetiva vertical, coeficiente de *Poisson* e módulo cisalhante a pequenas deformações. As simulações numéricas permitem quantificar a penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$ e a energia requerida para este processo, o que torna possível a comparação entre ensaios realizados com diferentes dimensões.

A rotina de cálculo proposta por Lobo *et al* (2007) é capaz de simular o processo de cravação do amostrador no solo, avaliando condições de embuchamento e, conseqüente, separação das

parcelas de reação (atrito e ponta) do solo durante a penetração. O programa possui um algoritmo numérico que simula o processo de cravação de um amostrador qualquer no solo. A rotina simula a propagação da onda e sua transmissão para o amostrador, a partir do impacto do martelo na composição de hastes a certa velocidade e também quantifica a energia absorvida pelo solo. A energia não absorvida pelo solo é devolvida sob a forma de uma onda ascendente de tração que segue pelo sistema até que toda a energia seja dissipada. Também são simulados os golpes subsequentes que ocorrem devido à reflexão de ondas no martelo após o primeiro impacto com o sistema, como demonstrado por Odebrecht *et al* (2005).

O algoritmo utiliza a teoria de propagação de ondas em barras para simular a propagação das ondas de tração e de compressão em um meio elástico, e o princípio do equilíbrio dinâmico para calcular as deformações e deslocamentos de cada elemento do sistema. Já o solo tem seu comportamento descrito a partir de um modelo elástico perfeitamente plástico.

A partir da simulação numérica é possível obter um diagrama de deslocamento e de forças atuantes em cada elemento do sistema (martelo, composição de hastes e amostrador) e também as parcelas de reação do solo e a energia absorvida pelo mesmo. A linguagem de programação utilizada é *Matlab 6.5* e o programa subdividi-se em 5 sub-rotinas que são apresentadas e detalhadas no trabalho apresentado por Lobo *et al* (2007).

Neste trabalho será apresentado, de forma sucinta, a rotina de cálculo do programa e os parâmetros requeridos para realizar as simulações. Os parâmetros de entrada que devem ser inseridos na rotina de cálculo são apresentados a seguir.

- Tempo de integração (TT): tempo no qual o programa simula o ensaio. Por meio de análises, através de simulações anteriores realizadas por Lobo *et al* (2007), optou-se por um tempo de 0,30 segundos.
- Relação de amortecimento do martelo e da composição de hastes (ZtH e ZtR): grandeza que estabelece a dissipação de energia que cada elemento irá sofrer durante a propagação da onda de tensão. Para efeito de análise, tem-se $ZtH = 0$ e $ZtR = 0$, o que nos indica uma simulação sem perdas;
- Taxa de restituição do golpe (e): representa as perdas de quantidade de movimento referentes ao choque entre dois corpos. Este coeficiente varia de zero a um, sendo que se nulo, representa um choque perfeitamente plástico e

unitário um choque perfeitamente elástico. Nesta simulação apresenta valor unitário, representando um choque perfeitamente elástico;

- Comprimento de haste superior ao nível do terreno (h): varia de acordo com a configuração de ensaio;
- Altura de queda do martelo (H): varia de acordo com a configuração de ensaio;
- Aceleração da gravidade (G ou g): apresenta o valor de $9,807 \text{ m/s}^2$;
- Módulo de elasticidade do aço (E_a): $2,05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$;
- Massa específica do aço (G_a): 7850 kg/m^3 .

Dimensões básicas dos ensaios:

- Seção transversal dos elementos: martelo (AH), composição de hastes (AR) e amostrador que é caracterizado pelos seus diâmetros interno ($sp.D_i$) e externo ($sp.D_e$), variando de acordo com a configuração de ensaio;
- Eficiência do Martelo (n_1): optou-se por um valor unitário, pelo fato de não se ter a eficiência dos martelos utilizados nos ensaios dinâmicos modificados;
- Comprimento dos elementos: martelo (LH), composição de hastes (LR) e do amostrador (LS), variando de acordo com a configuração do ensaio;
- Número de nós de discretização de cada elemento: martelo (nH), composição de hastes (nR) e do amostrador (nS), conforme configuração de ensaio. O número de nós de cada elemento é obtido de tal forma que cada componente do sistema seja discretizado em elementos de barra de 10 cm para o ensaio de referência, denominado 1,0 SPT. Para as demais configurações o comprimento dos elementos em está em escala de acordo com o fator de escala de comprimento de cada configuração de ensaio.

Com relação ao solo, tem-se os seguintes parâmetros de entrada:

- Tensão vertical efetiva (σ'_v): determinada a partir de um perfil de sondagem típico de um local que apresenta solo arenoso, Figura 4.1. Utiliza-se neste estudo um local arenoso da região de Osório – RS, cujas características vem sendo objeto de pesquisa no Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS, nos últimos 10 anos¹;
- Ângulo de atrito interno efetivo do solo (φ'): estimado por meio de cálculo, através de formulações publicadas na literatura (de Melo, 1971; Bolton, 1986; Odebrecht; 2003), e determinado através de análises de perfis de sondagens de um local que apresenta, predominantemente, solo arenoso. O valor médio adotado na análise teórica é de 35°;
- Módulo cisalhante a pequenas deformações (G_o): estimado através de cálculo por meio da equação (4.1);

$$G_o = C \cdot e^{-x} \cdot p_o^n \cdot p_a^{1-n} \quad (4.1)$$

onde:

e = índice de vazios do solo (nos estudos de casos nos quais não se tenha conhecimento do valor do índice de vazios e adota-se este valor como unitário, retirando assim, a influência deste parâmetro na estimativa de G_o);

$$p'_o \text{ a tensão média octaédrica do solo} = p'_o = \frac{1+2K_o}{3} \sigma_v ;$$

p_a = pressão atmosférica (100 kPa);

$C = 710$, $n = 0,5$ e $x = 1,3$, coeficientes médios conforme sugerido por Lo Presti *et al* (1997).

¹ O programa experimental foi idealizado para a cidade de Osório, porém por razões operacionais foi transferido para a cidade de Joinville – SC, conforme detalhado no Capítulo 5.

- Coeficiente de Poisson (ν): adotado como um valor constante de 0,3, valor sugerido por Lambe & Whitman (1979) para carregamento cíclico em solos arenosos;
- A penetração máxima interna de solo (r_{emb}): estimada conforme a equação (4.2) proposta por Lobo *et al* (2007);

$$r_{emb} = \frac{2.A_N}{\pi.D_i.\mu} \quad (4.2)$$

onde: A_N = seção transversal interna do amostrador;

D_i = diâmetro interno do amostrador;

$$\mu = \text{coeficiente de atrito} = \mu = \tan\left(\frac{\phi - 20^\circ}{2}\right).$$

- Penetração inicial ($sp.r_i$): penetração interna inicial de solo no amostrador, variando de acordo com a configuração de ensaio. Utilizando este parâmetro é possível simular a penetração média do amostrador nos primeiros 15 cm ($sp.r_i = 0$), a penetração média nos segundos 15 cm ($sp.r_i = 0,15$) e nos últimos 15 cm ($sp.r_i = 0,30$).

Depois de determinado todos os parâmetros de entrada do programa, cada um dos componentes do ensaio SPT é discretizado em elementos de barras conectados por nós caracterizados pela sua coordenada nodal, comprimento, massa e rigidez axial. A Figura 4.1 apresenta a discretização do sistema martelo-haste-amostrador proposto por Lobo (2007).

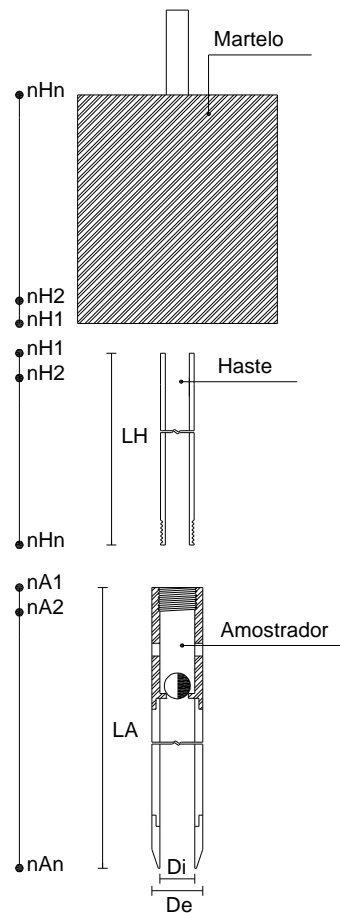


Figura 4.1: Discretização do sistema martelo-haste-amostrador (Lobo, 2007).

No programa não foram simulados o coxim de madeira, a cabeça de bater, a haste guia do martelo e as luvas da composição de hastes, pois segundo Lobo *et al* (2007) a inserção da cabeça de bater na rotina de cálculo ocasionou um elevado tempo computacional.

A partir dessas considerações ocorre a propagação da onda, através do impacto do martelo na composição de haste, que proporcionará a penetração do amostrador no solo. Para estimar as tensões de ruptura mobilizadas durante a penetração do amostrador, devido às semelhanças existentes no processo de cravação do amostrador SPT e de estacas, Lobo *et al* (2007) optou em utilizar as teorias de capacidade de carga de estacas associadas à expansão de cavidade. Adotou-se, para esta finalidade, a solução de Vésic (1972) que relaciona o mecanismo de ruptura do solo com a expansão de uma cavidade em um meio elasto-plástico.

O modelo de reação do solo sugerido por Lobo *et al* (2007) e implementado na rotina baseia-se no modelo proposto por Smith em 1960 e foi calibrado através de estudo de casos para verificar sua aplicabilidade em casos reais, destinado ao entendimento dos mecanismos de

penetração de ensaios dinâmicos e estacas. Todo este processo está descrito e pode ser visualizado no trabalho de Lobo *et al* (2007).

4.3 ANÁLISE NUMÉRICA DOS ENSAIOS DINÂMICOS MODIFICADOS

A análise numérica foi realizada a partir do dimensionamento dos ensaios dinâmicos apresentados no Capítulo 3 deste trabalho. A simulação numérica tem como objetivo a verificação dos ensaios no que diz respeito a sua configuração, ou seja, verificar se os ensaios dinâmicos concebidos através dos princípios de similaridade, apresentam mesma tensão ruptura quando executados.

4.3.1 Determinação dos parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada necessários para realizar a análise foram determinados a partir das características básicas do ensaio a ser simulado, entre eles a geometria do ensaio, os parâmetros que definem o comportamento do solo e os parâmetros relacionados com o processo de propagação de ondas. As dimensões básicas dos ensaios variam de acordo com a sua configuração. Com relação ao solo, os parâmetros de entrada foram determinados de acordo um perfil de sondagem típico de um local que apresenta solo predominante arenoso, conforme a Figura 4.2.

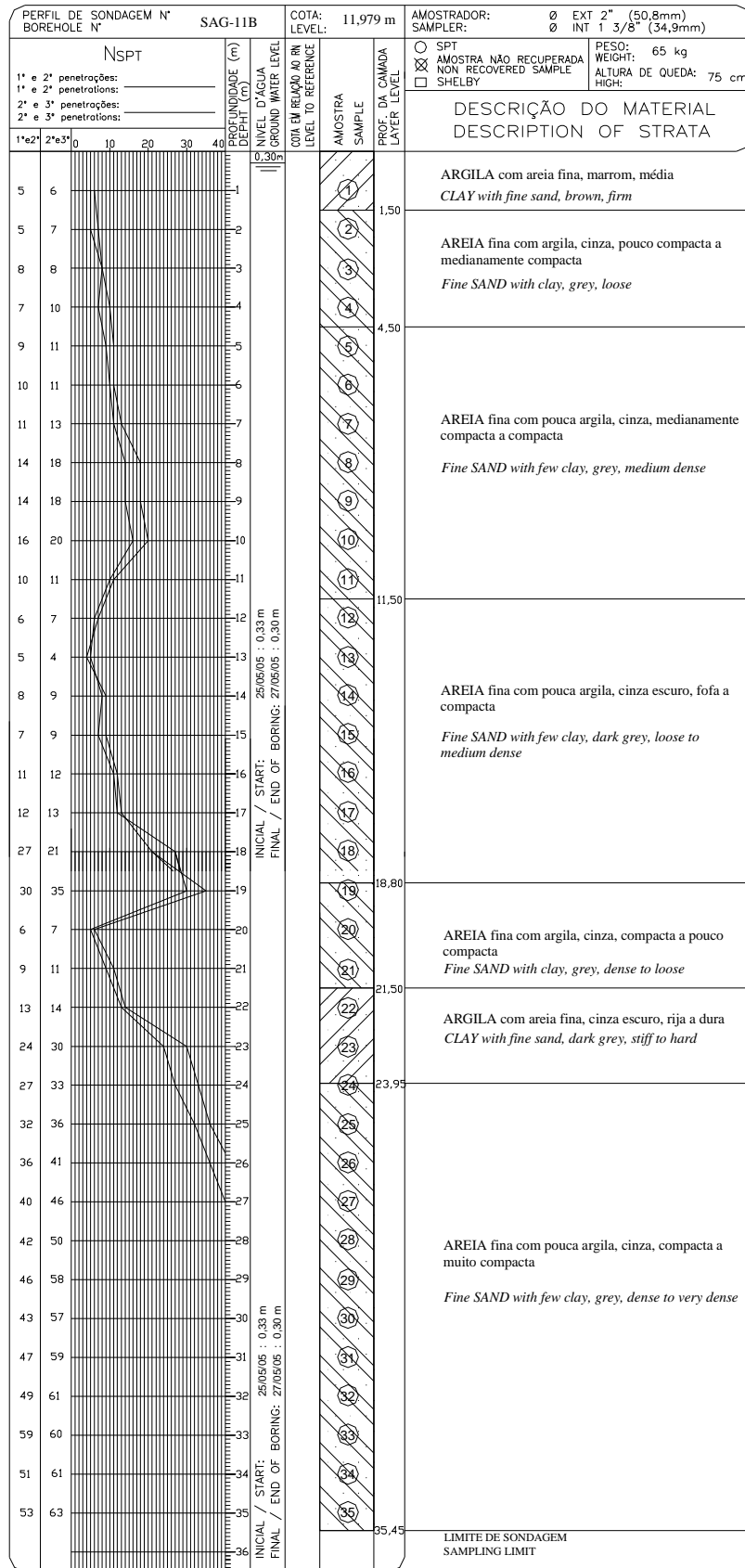


Figura 4.2: Perfil de sondagem típico de solo granular (areia de Osório – RS) utilizada na simulação numérica.

Observando a Figura 4.1 nota-se que o nível do lençol freático NA foi encontrado a 0,30 m e o perfil de sondagem é composto por materiais com características de areia e argila com areia fina, o que indica solo com peso específico γ variando em torno de 18 kN/m^3 .

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros de entrada referentes ao solo, os quais foram determinados a partir do perfil de sondagem, para cada profundidade de ensaio requerida.

Tabela 4.1: Parâmetros de entrada referentes ao solo.

SPT	Z (m)	σ'_v (kN/m^3)	G_o (MPa)	r_{emb} (m)	$sp.r_i$ (m)
0,5	5,00	62,5	4,41E+07	0,09	0,20
	11,00	122,5	6,18E+07		
	17,00	182,5	7,54E+07		
1,0	5,00	62,5	4,41E+07	0,13	0,30
	11,00	122,5	6,18E+07		
	17,00	182,5	7,54E+07		
1,5	5,00	62,5	4,41E+07	0,14	0,35
	11,00	122,5	6,18E+07		
	17,00	182,5	7,54E+07		
2,0	5,00	62,5	4,41E+07	0,20	0,40
	11,00	122,5	6,18E+07		
	17,00	182,5	7,54E+07		

Como pode ser observado na Tabela 4.1 a penetração máxima interna de solo r_{emb} foi estimada conforme a equação (4.2). A penetração interna inicial de solo no amostrador $sp.r_i$ é determinada de acordo com a configuração de ensaio, tendo como base o ensaio de referência 1,0 SPT, ou seja, multiplicando-se 0,30 m (consideração referente ao ensaio de referência 1,0 SPT) pelo fator de escala de comprimento de cada configuração de ensaio obtém-se os demais valores de penetração interna inicial de solo no amostrador $sp.r_i$.

4.3.2 Simulação dos ensaios dinâmicos modificados penetrando em ponta aberta (não considerando o embuchamento)

4.3.2.1 Ensaios dinâmicos idealizados (similaridade completa)

As dimensões básicas dos ensaios dinâmicos idealizados variam de acordo com a configuração do ensaio, determinada a partir dos fatores de escala referentes a cada ensaio, e apresentam as características demonstradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dimensões básicas dos ensaios dinâmicos idealizados.

SPT	Z (m)	Martelo		Haste			Amostrador		
		Massa (kg)	Altura de queda (m)	ϕ (mm)	Peso (kg/m)	Comprimento (m)	ϕ externo (mm)	ϕ interno (mm)	Altura (mm)
0,50	5,00	22,98	0,53	16,26	1,21	4,24	35,92	24,68	558,61
	11,00					8,48			
	17,00					12,73			
1,00	5,00	65,00	0,75	23,00	3,26	6,00	50,80	34,90	790,00
	11,00					12,00			
	17,00					18,00			
1,50	5,00	119,41	0,92	28,16	6,31	7,35	62,23	42,88	967,55
	11,00					14,70			
	17,00					22,04			
2,00	5,00	183,82	1,06	32,52	9,86	8,48	71,83	71,83	1117,23
	11,00					16,97			
	17,00					25,45			

A partir destas dimensões determinaram-se todos os parâmetros de entrada do programa, no que se refere aos equipamentos envolvidos no ensaio. Já para os parâmetros de entrada referentes ao solo foram utilizados os valores demonstrados na Tabela 4.1.

Nesta simulação todos os parâmetros necessários a simulação do ensaio estão totalmente em escala, mantendo condições de similaridade completa, inclusive a aceleração da gravidade, conforme representado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores de aceleração da gravidade em escala.

SPT	Aceleração da gravidade (m/s ²)
0,5	13,867
1,0	9,807
1,5	8,007
2,0	6,934

Uma vez determinado os parâmetros de entrada, de acordo com cada configuração de ensaio, realizou-se a simulação numérica dos mesmos, quantificando a energia absorvida pelo solo E_s e a penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$. Com isto é possível determinar, numericamente, a força dinâmica F_d , calculada pela equação (4.4) proposta por Odebrecht (2003), e a tensão de ruptura do solo σ_{rup} , através da razão entre a força dinâmica F_d e a área de ponta do amostrador.

$$F_d = \frac{\eta_3[\eta_1(0,75 + \Delta\rho)M_m g + \eta_2 \Delta\rho M_h g]}{\Delta\rho} \quad (4.4)$$

onde: M_m = massa do martelo;

g = aceleração da gravidade;

M_h = massa da haste;

$\Delta\rho$ = penetração permanente do amostrador devido à aplicação de um golpe;

η_1 = eficiência referente à parcela do martelo = 0,761;

η_2 = perdas ao longo das hastes = 1;

η_3 = eficiência do sistema = 0,907-0,0066l.

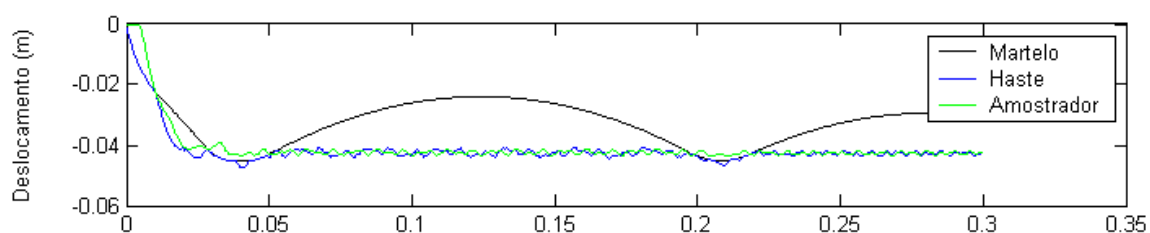
Na presente análise os cálculos foram realizados como se não existissem perdas, portanto η_1 , η_2 e η_3 apresentam valores unitários.

Os resultados das simulações dos ensaios dinâmicos idealizados são apresentados na Tabela 4.4. Observando a tabela percebe-se que os valores de tensão de ruptura para as diferentes configurações de ensaio, nas mesmas profundidades, apresentam valores similares.

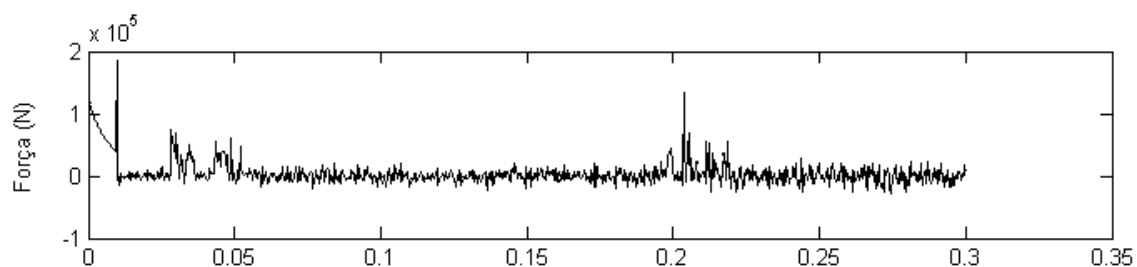
Tabela 4.4: Resultado da simulação numérica dos ensaios dinâmicos modificados idealizados.

SPT	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Área amostrador (m ²)	Energia (J)	$\Delta\rho$ (m)	F_d (kN)	σ_{rup} (MPa)
0,50	5,00	4,24	0,001013	229,30	0,054	4,24	4,18
	11,00	8,49		227,00	0,030	7,68	7,57
	17,00	12,73		218,78	0,020	10,94	10,79
1,00	5,00	6,00	0,002027	695,20	0,081	8,60	4,24
	11,00	12,00		686,88	0,044	15,55	7,67
	17,00	18,00		656,71	0,030	22,18	10,94
1,50	5,00	7,35	0,003042	1367,37	0,106	12,94	4,25
	11,00	14,70		1299,55	0,056	23,41	7,70
	17,00	22,04		1250,26	0,037	33,35	10,96
2,00	5,00	8,49	0,004052	2114,20	0,123	17,18	4,24
	11,00	16,97		1973,50	0,064	30,85	7,61
	17,00	25,45		1916,71	0,043	44,31	10,93

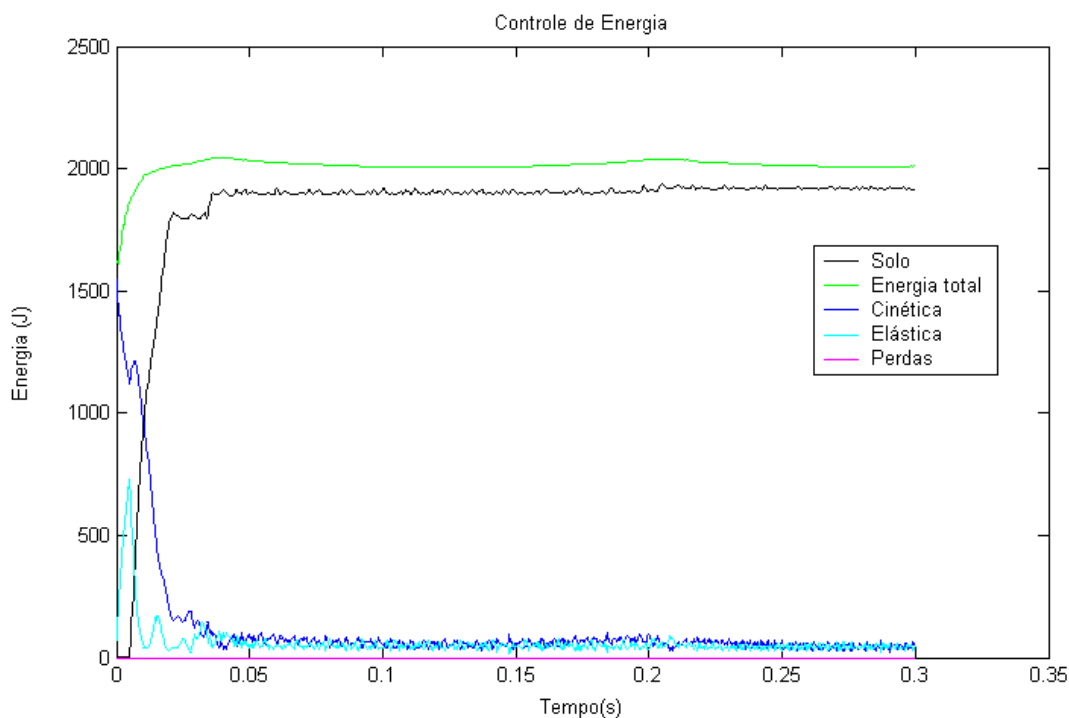
A seguir são apresentadas algumas figuras com o objetivo de ilustrar resultados típicos do programa. Na Figura 4.3 são apresentados os resultados registrados na simulação numérica do ensaio 2,0 SPT executado na profundidade de 17 m. Na Figura 4.3 (a) são apresentados os sinais de deslocamento dos componentes do ensaio (martelo, sistema de hastes e amostrador), enquanto que na Figura 4.3 (b) são apresentados os sinais de força simulados no topo da composição de hastes. Na figura 4.4 (c) são apresentados os sinais de energia simulados.



(a) Sinais de deslocamento dos componentes do ensaio.



(b) Sinais de força simulados no topo da composição de hastes.



(c) Sinais de energia simulados.

Figura 4.3: Resultados registrados na simulação numérica do ensaio 2,0 SPT executado na profundidade de 17 m.

Observando a Figura 4.3 (a) verifica-se que o deslocamento da haste e amostrador ocorrem, praticamente, juntos a partir do golpe do martelo, e este encontra a composição de hastes, aproximadamente, no tempo 0,004 segundos e volta a tocar a composição no tempo 0,21 segundos, isto ocorre até que toda a energia provocada pelo golpe seja dissipada e o martelo pare de tocar a composição haste-amostrador. A Figura 4.3 (b) apresenta a força dinâmica de reação do solo à cravação do amostrador SPT, sendo que se podem notar picos de valores no momento em que o martelo toca a composição haste-amostrador. Já na Figura 4.3 (c) têm-se os sinais de energia simulados pelo programa, demonstrando como ocorre a dissipação das parcelas referentes a energia total, cinética e elástica durante o percurso da onda gerada pelo golpe do martelo.

4.3.2.2 Experimento (similaridade incompleta)

A Tabela 4.5 apresenta as características e dimensões básicas dos ensaios dinâmicos modificados executáveis.

Tabela 4.5: Dimensões básicas dos ensaios dinâmicos executados no experimento.

SPT	Z (m)	Martelo		Haste				Amostrador		
		Massa (kg)	Altura de queda (m)	ϕ externo (mm)	ϕ interno (mm)	Peso (kg/m)	Comprimento (m)	ϕ externo (mm)	ϕ interno (mm)	Altura (mm)
0,50	5,00	23	0,50	17,10	10,70	1,10	6,50	36,00	25,00	560,00
	11,00						12,50			
	17,00						19,00			
1,00	5,00	65	0,75	33,40	24,30	3,24	6,00	50,80	34,90	790,00
	11,00						12,00			
	17,00						18,00			
1,50	5,00	120	0,75	36,00	16,00	6,60	5,50	61,30	38,16	970,00
	11,00						11,00			
	17,00						17,00			
2,00	5,00	120	1,15	50,00	32,00	9,56	6,00	73,00	53,94	1120,00
	11,00						12,00			
	17,00						18,00			

A partir das dimensões demonstradas na Tabela 4.5 determinaram-se todos os parâmetros de entrada do programa, no que se refere aos equipamentos envolvidos no ensaio. Os parâmetros de entrada referentes ao solo foram utilizados conforme os demonstrados anteriormente na Tabela 4.1.

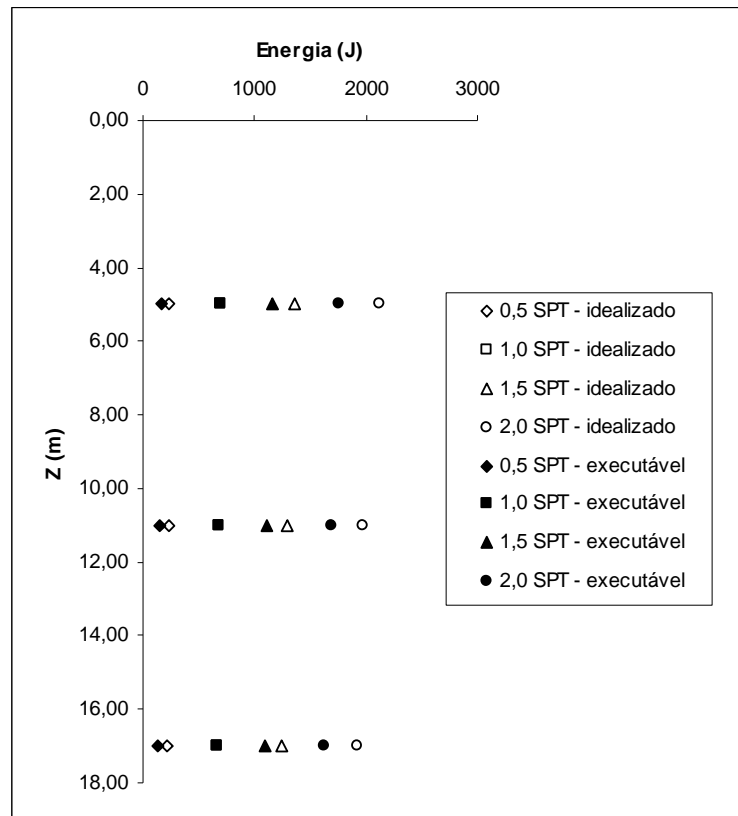
De maneira análoga aos ensaios dinâmicos idealizados, realizou-se a simulação numérica quantificando a energia transmitida para o solo devido a aplicação do golpe do martelo E_s e a penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$. A partir daí determinou-se a força dinâmica F_d e a tensão de ruptura σ_{rup} . Os resultados das simulações dos ensaios dinâmicos executados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Resultado da simulação numérica dos ensaios dinâmicos executados no experimento.

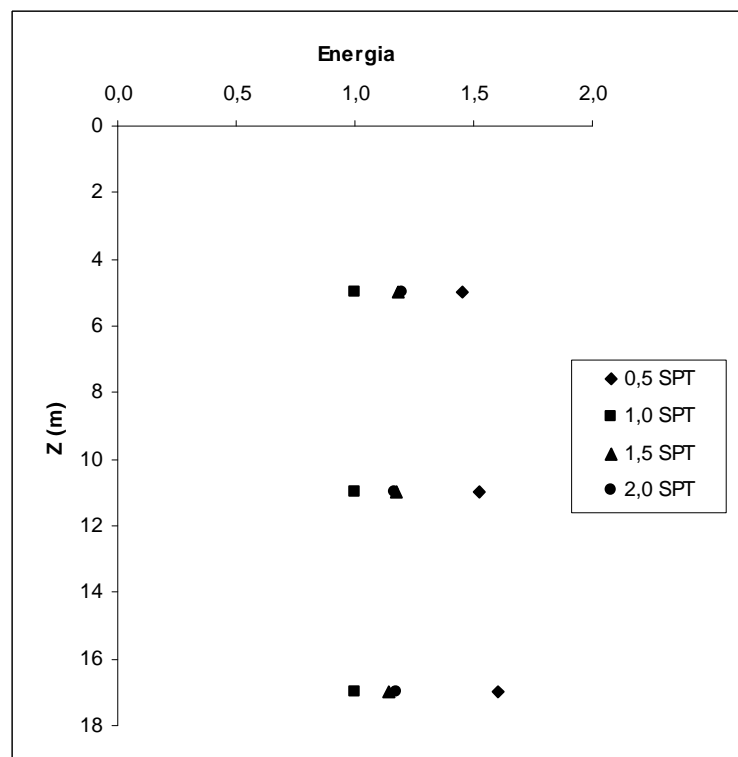
SPT	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Área amostrador (m ²)	Energia (J)	$\Delta\rho$ (m)	F_d (kN)	σ_{rup} (MPa)
0,50	5,00	6,50	0,001013	158,21	0,040	3,99	3,92
	11,00	12,50		148,73	0,021	7,24	7,12
	17,00	19,00		136,41	0,013	10,35	10,17
1,00	5,00	6,00	0,002027	695,20	0,081	8,60	4,24
	11,00	12,00		686,88	0,044	15,55	7,67
	17,00	18,00		656,71	0,030	22,18	10,94
1,50	5,00	5,50	0,003042	1159,33	0,097	11,90	4,17
	11,00	11,00		1109,34	0,052	21,39	7,49
	17,00	17,00		1093,52	0,036	30,58	10,71
2,00	5,00	6,00	0,004052	1764,26	0,106	16,65	3,98
	11,00	12,00		1696,07	0,056	30,05	7,18
	17,00	18,00		1626,77	0,038	42,92	10,25

Da mesma forma que para os ensaios idealizados, a tensão de ruptura para os ensaios executados apresentada na Tabela 4.6, apresenta valores similares quando comparando os resultados dos ensaios nas mesmas profundidades.

As Figuras 4.4 a 4.7 ilustram, respectivamente, energia, penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$, força dinâmica F_d e a tensão de ruptura dos ensaios idealizados e executáveis, plotados contra a profundidade Z.



(a) Energia absorvida pelo solo determinada pelo programa.



(b) Energia normalizada para verificação do erro experimental.

Figura 4.4: Energia absorvida pelo solo.

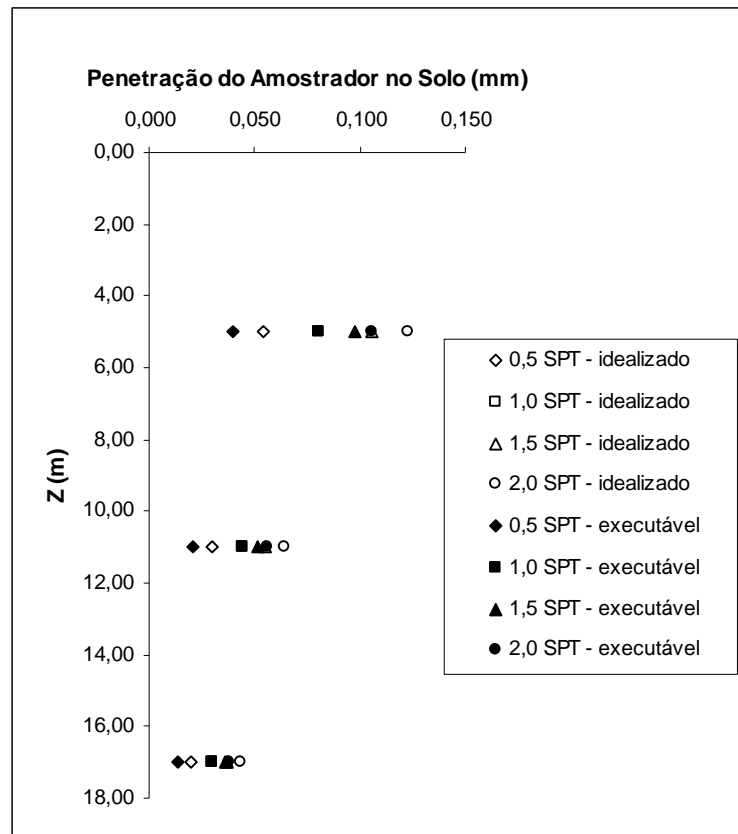


Figura 4.5: Penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$.

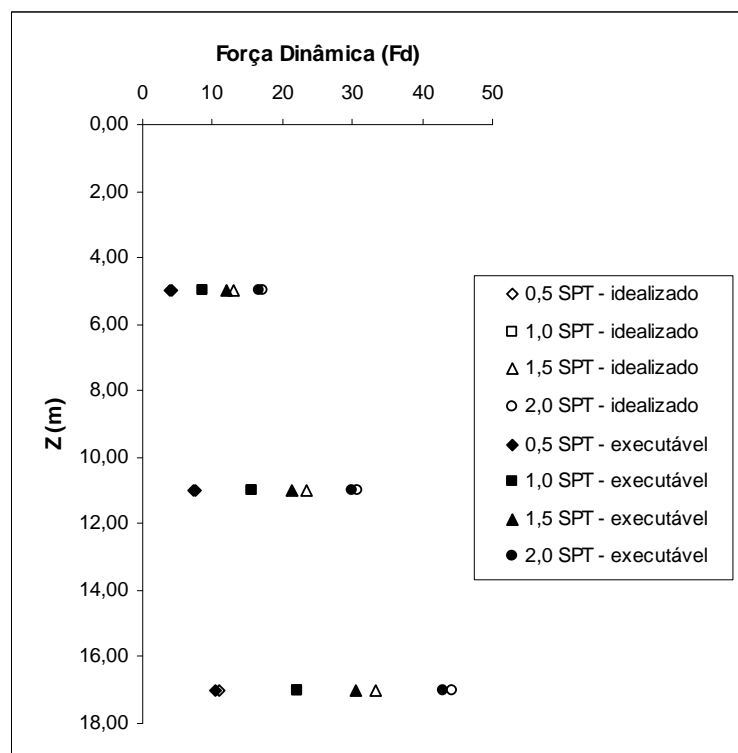


Figura 4.6: Força dinâmica F_d .

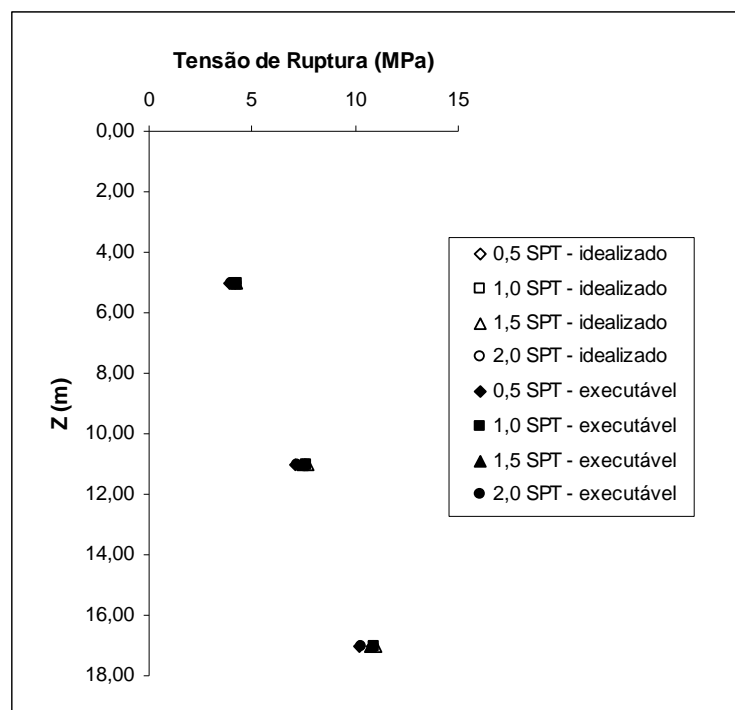


Figura 4.7: Tensão de ruptura.

Observando a Figura 4.4 (a) percebe-se que a energia mantém-se praticamente constante ao longo da profundidade para todas as configurações de ensaio. Visualiza-se também que a energia transmitida para o solo aumenta de acordo com o aumento da geometria do ensaio. Isto ocorre devido a maior massa dos equipamentos dos ensaios, que levam a um acréscimo de energia absorvida pelo solo. A maior diferença de energia, comparando ensaios idealizados e executados, é da ordem de 30 % para o ensaio 0,5 SPT. Para os ensaios 1,5 SPT e 2,0 SPT, os erros estão próximos de 15 %. A existência destes erros, observados com o auxílio da Figura 4.4 (b), deve-se aos efeitos de escala porque, como se sabe, em estudos experimentais utilizando ensaios em escala nem sempre é possível respeitar todas as condições de similaridade. Portanto, como nos ensaios executados algumas grandezas desrespeitam a escala do problema, ocorrem distorções nos resultados.

No que diz respeito a penetração do amostrador no solo, a Figura 4.5 demonstra que a penetração diminuiu com o aumento da profundidade de ensaio, o que já é esperado, porque quanto maior a profundidade, maior o grau de confinamento a que o solo está submetido. Percebe-se também que os valores de penetração aumentam de acordo com a configuração de ensaio a uma mesma profundidade. Isto ocorre devido a característica geométrica dos equipamentos que apresentam massas crescentes, gerando um aumento da energia transmitida ao solo e, conseqüentemente, maior penetração. Para equipamentos com dimensões

equivalentes percebe-se que há diferenças nas penetrações devido aos efeitos de escala. Os efeitos de escala entre penetrações de ensaios idealizados e executados, na mesma profundidade, são da ordem de 30 % para o ensaio 0,5 SPT, 6 % para o ensaio 1,5 SPT e 12% para o ensaio 2,0 SPT.

A força dinâmica de reação do solo à cravação do amostrador SPT aumenta ao longo da profundidade de ensaio e também com a configuração do mesmo (Figura 4.6). Isto ocorre pelo fato deste valor estar relacionado com a energia absorvida pelo solo, que aumenta com a configuração de ensaio e mantém-se constante ao longo da profundidade e também com o valor de penetração, que diminui ao longo da profundidade e aumenta com a configuração de ensaio, fazendo com que a força dinâmica torne-se crescente. A diferença do valor de força dinâmica entre os ensaios executados e idealizados é da ordem de 5% para o ensaio 0,5 SPT, 8% para o ensaio 1,5 SPT e 3% para o ensaio 2,0 SPT.

Avaliando a tensão de ruptura do solo através da Figura 4.7, percebe-se que a mesma aumenta ao longo da profundidade de ensaio e mantém-se, praticamente, constante para todas as configurações. Estes valores praticamente iguais de tensão de ruptura permitem concluir que o projeto dos equipamentos respeita os conceitos de similaridade e apresenta condições de ser executado. Para as três profundidades analisadas ocorreram diferenças nos valores de tensão da ordem de 6 % para os ensaios 0,5 e 2,0 SPT e de 3% para o ensaio 1,5 SPT, que podem ser consideradas desprezíveis para ensaios de penetração dinâmica como o SPT.

Avaliando as simulações numéricas pode-se dizer que os efeitos de escala observados durante a análise das penetrações e energias simuladas foram compensados durante o processo de cravação do amostrador no solo, indicando que o projeto dos equipamentos respeita os conceitos de similaridade. A equivalência dos valores das tensões de ruptura encontradas na simulação numérica dos ensaios mostra a inexistência de efeitos de escala entre os ensaios dinâmicos idealizados e executáveis.

A simulação dos ensaios dinâmicos modificados foi realizada somente para os ensaios penetrando em ponta aberta, ou seja, não considerando o embuchamento. Para os ensaios dinâmicos modificados considerando penetração em ponta fechada (embuchamento) a simulação é análoga aos ensaios penetrando em ponta aberta. Isso acontece porque o modelo já considera o amostrador embuchado, ou seja, tem-se uma penetração inicial ($sp.r_i$ – penetração interna inicial de solo no amostrador) que é maior que a penetração interna

máxima. Esta penetração varia de acordo com a configuração de ensaio, conforme demonstrado anteriormente. O objetivo de simular experimentalmente os ensaios com penetração em ponta fechada (amostrador embuchado) é para refinar o modelo de embuchamento do amostrador utilizado no programa.

4.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresentou a análise numérica de ensaios dinâmicos modificados idealizados e executáveis através de um programa numérico que consegue simular ensaios dinâmicos a partir de características básicas do ensaio (geometria) e de propriedades do solo como ângulo de atrito, tensão efetiva vertical, coeficiente de *Poisson* e módulo cisalhante a pequenas deformações.

Tendo como objetivo verificar as condições de similaridade entre os ensaios dinâmicos modificados idealizados e executáveis, a simulação numérica propiciou verificar a inexistência de fatores de escala entre os referidos ensaios. Isto é comprovado através da equivalência de valores das tensões de ruptura encontrados na simulação dos ensaios idealizados e executáveis, observando que a tensão de ruptura a uma mesma profundidade é igual para todas as dimensões de ensaio.

Este fato confirma a hipótese inicial, reafirmando que ensaios projetados respeitando as condições de similaridade apresentam a mesma tensão de ruptura. Assim, é possível dizer que o projeto dos equipamentos respeita os conceitos de similaridade e apresenta condições de ser executado através de uma campanha experimental de ensaios de campo que é apresentada no Capítulo 5 deste trabalho.

5 PROGRAMA DE EXPERIMENTOS

5.1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de verificar experimentalmente as semelhanças geométricas envolvidas no processo dinâmico de cravação, avaliando a penetração do amostrador no solo e sua respectiva tensão de ruptura bem como comprovar experimentalmente algumas conclusões descritas no capítulo anterior, foi programada uma campanha de ensaios de campo. Para tanto, foi projetada uma bateria de ensaios utilizando-se o ensaio SPT e mais três ensaios dinâmicos modificados², dimensionados e descritos no Capítulo 3 deste trabalho.

A campanha de ensaios foi realizada em um solo residual predominantemente arenoso localizado na cidade de Joinville, estado de Santa Catarina nas instalações da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Nas Figuras 5.1 e 5.2 tem-se, respectivamente, a visualização da entrada da UDESC e do local onde se executaram os ensaios.

² Executou-se somente o ensaio SPT convencional, o ensaio 0,5 SPT e 2,0 SPT. O ensaio 1,5 SPT não foi realizado pelo fato das hastes utilizadas no ensaio de cone, optadas para esta configuração de ensaio, não estarem disponíveis no momento da realização dos ensaios.



Figura 5.1: Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

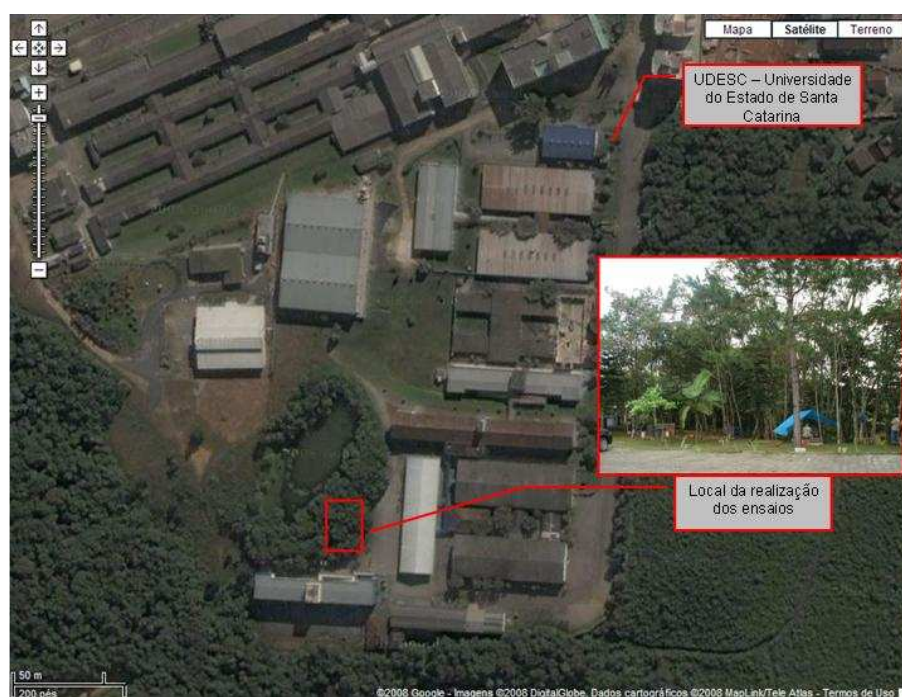


Figura 5.2: Local da realização dos ensaios.

5.2 METODOLOGIA

5.2.1 Montagem do Equipamento

O equipamento de sondagem, para cada configuração de ensaio, foi montado conforme especificado em norma – NBR 6484/2001 Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Assim, foi possível a execução dos ensaios onde somente o comprimento da composição da haste sofria mudanças e o tripé era movimentado quando da ocorrência de um novo furo de sondagem.

As hastes foram instaladas dentro do tubo de revestimento normalmente utilizado em sondagem, com exceção do ensaio 2,0 SPT onde se utilizou um tubo de revestimento com um diâmetro maior. Na parte superior do conjunto haste-amostrador foi deixado um pequeno espaço sem revestimento e durante cada golpe foi registrado, com o auxílio de giz e de uma fita métrica, a penetração permanente de cada golpe. A Figura 5.3 ilustra o equipamento SPT montado e a Figura 5.4 a marcação com giz, efetuada para determinar a penetração permanente de cada golpe.



Figura 5.3: Equipamento SPT montado.



Figura 5.4: Marcação com giz, utilizada na determinação da penetração permanente de cada golpe.

5.2.2 Equipamentos

O tripé utilizado foi o mesmo que se usa em ensaios de sondagens convencionas. A roldana, localizada na parte superior do tripé, utilizada para içar o martelo é montada sobre um eixo com a utilização de dois rolamentos o que a torna extremamente leve ao giro. A elevação do martelo até a altura de queda desejada foi realizada manualmente através de dois sistemas: primeiro com o auxílio de um cabo de aço e posteriormente por meio de corda flexível de sisal, conforme previsto em norma.

O martelo, cabeça de bater, hastes, luvas e os amostradores utilizados são aqueles descritos no Capítulo 3 deste trabalho, projetados e usinados com modificações realizadas através de uma análise dimensional. Os demais equipamentos necessários para se realizar os ensaios foram utilizados conforme solicitado pela NBR 6484/2001.

Sabe-se que haste do ensaio SPT convencional, conforme previsto em norma, apresenta 3,23 kg/m, porém o equipamento utilizado nesta campanha de ensaios, o qual utilizou elevação do martelo com o auxílio de um cabo de aço, é composto por hastes de sondagem apresentando 2,7 kg/m. Já o equipamento com sistema de elevação realizado por meio de corda flexível de sisal, conforme previsto em norma, apresenta hastes com 3,23 kg/m, portanto, estando em conformidade com a NBR 6484/2001.

As Figuras 5.5 a 5.8 mostram o esquema da composição martelo, cabeça de bater, haste e amostrador utilizada na execução dos ensaios 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 SPT, respectivamente.



Figura 5.5: Composição do ensaio 0,5 SPT.



Figura 5.6: Composição do ensaio 1,0 SPT.



Figura 5.7: Composição do ensaio 1,5 SPT.



Figura 5.8: Composição do ensaio 2,0 SPT.

Tendo-se os equipamentos e suas composições perfeitamente montadas, executaram-se os furos de sondagem e os ensaios de penetração. A Figura 5.9 mostra a locação dos furos de sondagem no terreno do local de ensaio.

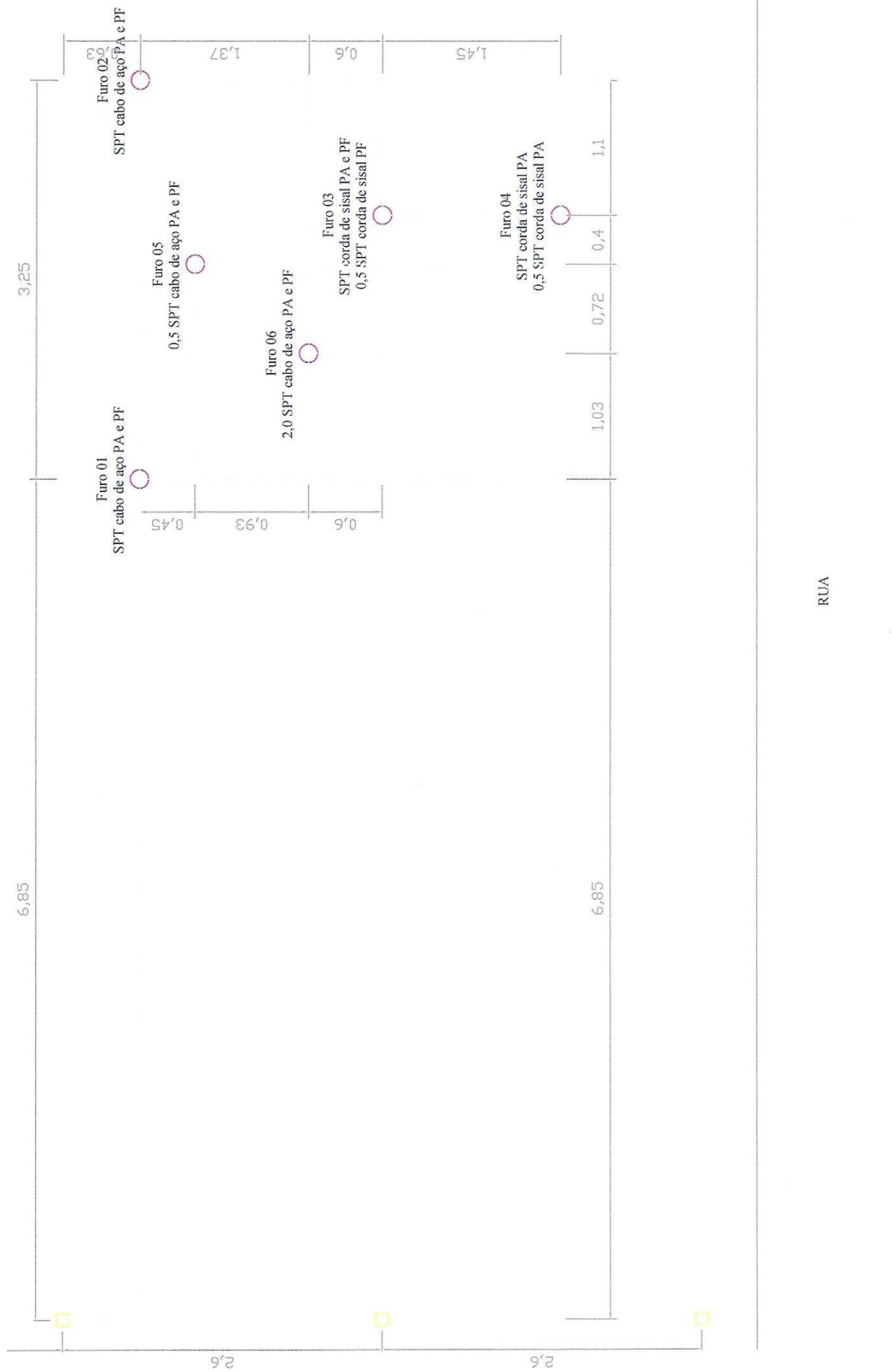


Figura 5.9: Localização dos furos de sondagem.

Como pode ser observado na Figura 5.9, foram realizados 6 furos de sondagem no local onde realizou-se a bateria de ensaios. Os ensaios estão divididos em quatro grandes configurações:

Estudo dos Efeitos de Escala em Ensaios de Penetração Dinâmica

- a) penetração em ponta aberta – PA (não considerando o embuchamento), com sistema que utiliza cabo de aço;
- b) penetração em ponta aberta – PA (não considerando o embuchamento), com sistema que utiliza corda de sisal;
- c) penetração em ponta fechada – PF (com colocação de uma ponteira cônica), com sistema que utiliza cabo de aço;
- d) penetração em ponta fechada – PF (com colocação de uma ponteira cônica), com sistema que utiliza corda de sisal.

O objetivo de executar os ensaios com penetração em ponta fechada (amostrador embuchado) é refinar o modelo de embuchamento do amostrador utilizado no programa proposto por Lobo *et al* (2007) e utilizado neste estudo para simular os ensaios de penetração dinâmica.

A Tabela 5.1 apresenta o tipo de ensaio executado em cada furo de sondagem.

Tabela 5.1: Caracterização dos furos de sondagem

Furo	Ensaio	Sistema	Penetração	Profundidade de ensaio
01*	SPT convencional	Cabo de aço	Ponta aberta e ponta fechada	1m a 5 m
02	SPT convencional	Cabo de aço	Ponta aberta e ponta fechada	1m a 17 m
03	SPT convencional	Corda de sisal	Ponta aberta e ponta fechada	5 m, 11 m e 17 m
	0,5 SPT	Corda de sisal	Ponta fechada	5 m, 11 m e 17 m
04	SPT convencional	Corda de sisal	Ponta aberta	5 m, 11 m e 17 m
	0,5 SPT	Corda de sisal	Ponta aberta	5 m, 11 m e 17 m
05	0,5 SPT	Cabo de aço	Ponta aberta e ponta fechada	5 m, 11 m e 17 m
06	2,0 SPT	Cabo de aço	Ponta aberta e ponta fechada	5 m e 11 m

* Perda do amostrador - ensaio de ponta fechada.

Nos Furos 01 e 02, os ensaios foram realizados com SPT convencional a cada metro para se ter um perfil de sondagem típico do local e também para a retirada de amostras. No Furo 06, onde foi realizado o ensaio 2,0 SPT, não foi possível realizar o ensaio na profundidade de 17 m devido a dificuldades de operação do equipamento (hastes com peso elevado e dificuldade de retirada da composição haste-amostrador do interior do furo de sondagem). Nos demais furos os ensaios foram realizados nas profundidades de 5 m, 11 m e 17 m, profundidades de ensaios determinadas no programa experimental, concebido de forma a possibilitar a comparação entre os diferentes ensaios testados a mesmas profundidades, conforme apresentado no Capítulo 3 desta dissertação.

5.2.3 Solo

A campanha de ensaios de campo foi realizada na cidade de Joinville, município brasileiro do estado de Santa Catarina. Joinville está situada na região norte do estado, fazendo divisa com os municípios de Schroeder e Jaraguá do Sul (ao oeste), São Francisco do Sul (ao leste), Campo Alegre e Garuva (ao norte) e Araquari, Guaramirim (ao sul). Na Figura 5.10 tem-se o mapa do estado de Santa Catarina onde pode-se visualizar o município de Joinville.



Figura 5.10: Mapa do estado de Santa Catarina.

O local escolhido na cidade está localizado na Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, e é caracterizado por um solo residual formado, predominantemente, por um silte arenoso.

França (2002) realizou um estudo que possibilitou a caracterização das unidades geotécnicas da área urbana de Joinville através da aplicação de dados disponíveis de pedologia e geologia, bem como através de resultados de ensaios de sondagens executados em determinados locais do município. De acordo com estudos de levantamento geotécnicos realizados por França

(2002), com base em uma análise específica, o projeto resultou nas seguintes unidades geotécnicas:

- a) Litólico substrato granulítico (Rgl): Solos encontrados nos topos de morros e encostas, pois se desenvolvem em relevo ondulado até escarpado. Ocorrem, em geral, associados a afloramentos rochosos;
- b) Cambissolo substrato granulítico (Cgl): Textura argilosa e muito argilosa de substrato granulítico podendo apresentar linha de seixo;
- c) Podzólico Vermelho-Amarelo substrato Granulítico (PVgl): Solos com grande variação de características. Horizonte B: textura argilosa com cores vermelhas até amareladas, que difere do horizonte A (mais escuro devido a matéria orgânica) e do C (que ainda guarda a estrutura da rocha). A classificação granulométrica dos horizontes B e C aponta para solos siltosos;
- d) Cambissolo substrato depósito de encosta (Cde): é resultado da movimentação de solos das áreas mais altas, tratando-se inicialmente de um colúvio. As características geotécnicas são bastante variáveis e dependem das características mineralógicas e texturas do material de origem;
- e) Podzol Hidromórfico substrato sedimento Quaternários (HPsq): na área urbana de Joinville apresentam textura arenosa. O teor médio silte mais argila fica abaixo de 9%. É um solo não plástico. Observa-se a presença de argila mole abaixo de uma camada de areia compacta;
- f) Gleissolo substrato sedimento Quaternários (Gsq): apresenta característica de argila mole.
- g) Solos orgânicos sedimentos Quaternários (HOsq).

Maiores detalhes sobre a proposta de mapeamento geotécnico da cidade de Joinville podem ser observados no trabalho de apresentado por França (2002) e visualizado na Figura 5.11, a qual apresenta o mapeamento da cidade de Joinville com suas respectivas unidades geotécnicas.

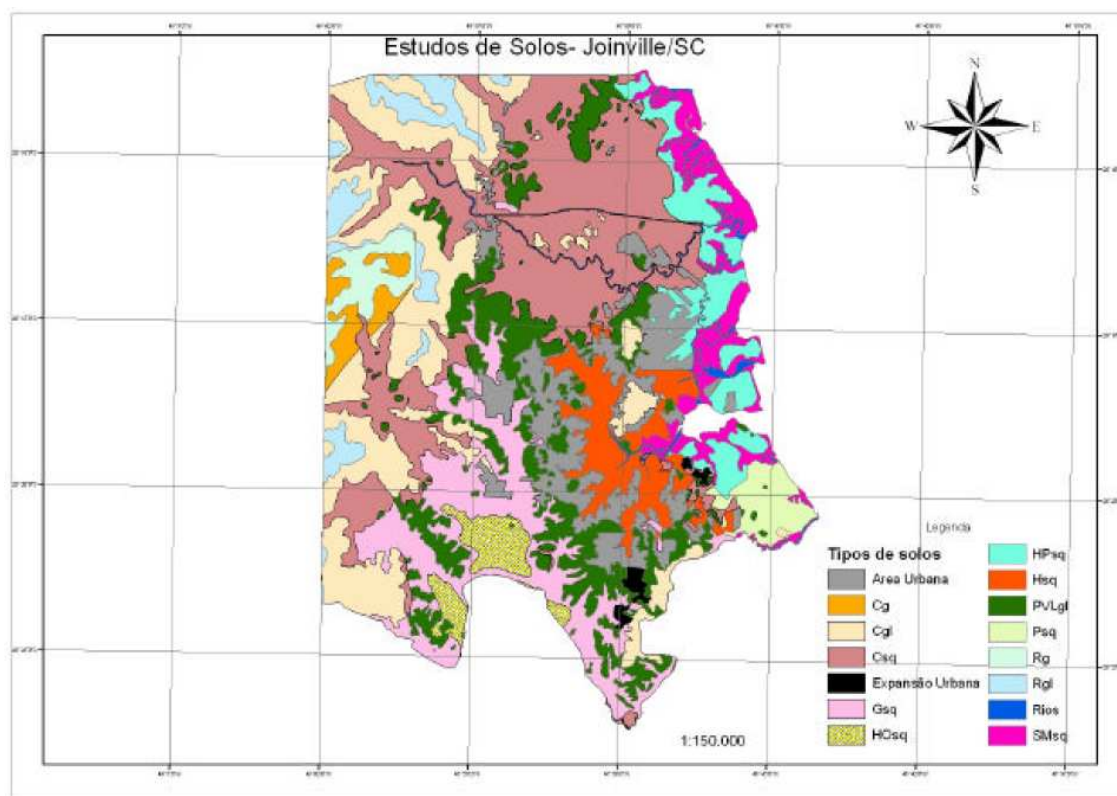


Figura 5.11: Mapa Geotécnico de Joinville (França, 2002 apud Pereira et al, 2004).

5.2.4 Ensaaios

5.2.4.1 Ensaio SPT

Com os equipamentos montados, como relatado nos capítulos anteriores, foi possível a realização dos ensaios. Na presente campanha foi registrado, com o auxílio de giz e de uma fita métrica, a penetração permanente de cada golpe. O mesmo procedimento foi realizado para todas as configurações de ensaio. O ensaio SPT convencional com sistema com cabo de aço, realizado no furo de sondagem 02, foi executado a cada metro e utilizado para determinar o perfil de sondagem típico do local. A perfuração foi executada com trado manual até a profundidade do nível d'água. Na Figura 5.12 pode-se visualizar o equipamento utilizado na execução da sondagem.



Figura 5.12: Equipamento utilizado na execução da sondagem.

Depois de encontrado o nível d'água utilizou-se do trépano de lavagem em conjunto com a bica para prosseguir a sondagem (Figura 5.13), seguindo-se procedimento recomendado pela norma brasileira.



Figura 5.13: Bica de lavagem.

O ensaio foi realizado até a profundidade de 17 m, determinada no programa experimental. O nível d'água inicial foi encontrado a 1,80 m e após 24 horas estabilizou a 4,75 m. Utilizou-se tubo de revestimento até a profundidade de 1,50 m.

Para o ensaio de penetração dinâmica, o amostrador-padrão, conectado às hastes de penetração, foi colocado no furo de sondagem apoiando-o suavemente no fundo. Após foi conferida a profundidade com medida feita com auxílio da haste de penetração e também fita métrica. Depois de posicionado o amostrador, e colocada a cabeça de bater no topo da haste, o martelo foi apoiado suavemente sobre a cabeça de bater. Assim, marcou-se na haste de perfuração, com giz, um segmento de 45 cm dividido em três trechos iguais de 15 cm. Para efetuar a cravação do amostrador-padrão, o martelo foi erguido até uma altura de 75 cm por meio de um cabo de aço encaixado em uma roldana, como pode ser observado na Figura 5.14.



Figura 5.14: Processo de cravação do amostrador-padrão.

A cravação do amostrador no solo prosseguiu através de impactos sucessivos do martelo até a cravação de 45 cm do amostrador. Durante este processo foi registrado a penetração

permanente de cada golpe e também o número de golpes necessários à cravação de cada 15 cm do amostrador, conforme Figura 5.15.



Figura 5.15: Registro, com o auxílio de giz e de uma fita métrica, da penetração permanente de cada golpe.

Durante a execução das sondagens, foram retiradas amostras representativas das várias camadas, colhidas por meio da cravação do amostrador em 3 etapas de 15 cm sucessivos. Na Figura 5.16 pode ser visualizado o amostrador-padrão com amostra de solo recuperada.



Figura 5.16: Amostrador-padrão com amostra de solo.

Com os dados coletados em campo foi possível realizar a descrição do subsolo, através da análise tátil-visual, e também o perfil de sondagem típico do solo. Esses resultados podem ser observados na Tabela 5.2 e Figura 5.17.

Tabela 5.2: Análise tátil-visual do solo

Furo	N _{SPT}	Z (m)	Descrição do solo – Análise tátil-visual
01	2	0	Argila Siltosa vermelha
	9	1	
	8	2	Argila Siltosa vermelha muito plástica
	9	3	Argila Siltosa Variada com quartzo
	10	4	Argila Siltosa Variada
	13	5,1**	
02	17	6	Silte Arenoso de cor variada
	20	7	
	13	8	
	21	9	
	20	10	
	23	11,4	
	22	12	
	19	13	
	26	14	
	27	15	
	27	16	
	31	17	

** Perda do amostrador - ensaio de ponta fechada.

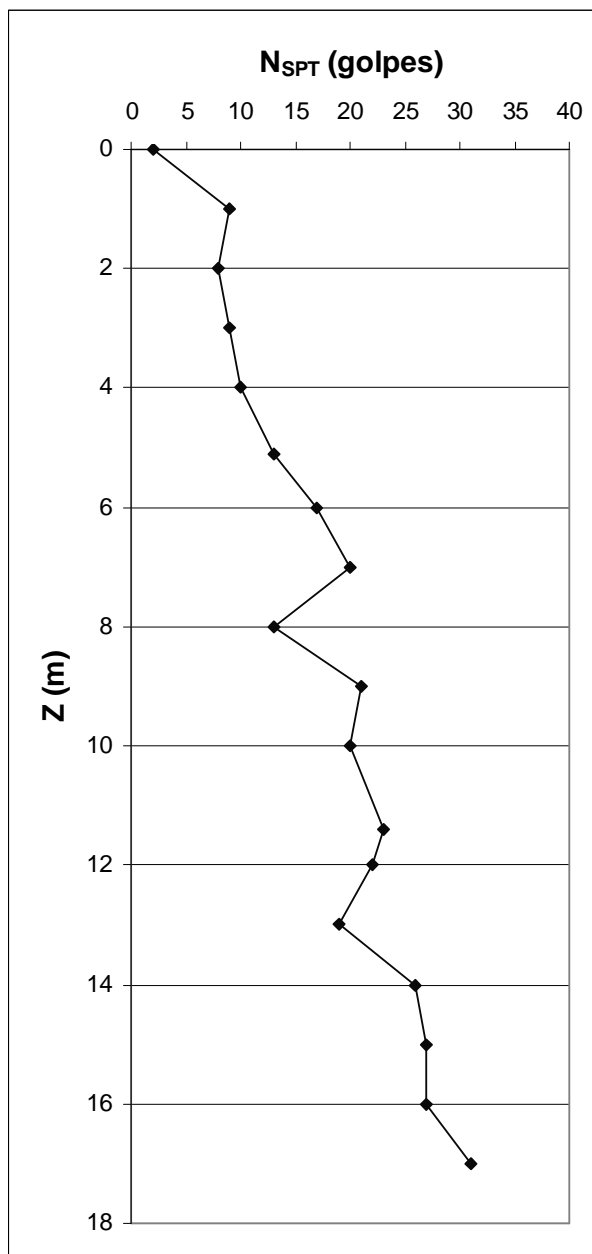


Figura 5.17: Perfil de sondagem

Observando a caracterização do solo através da análise tátil-visual, percebe-se que o perfil típico do solo é composto por materiais com características de um silte arenoso, como mencionado anteriormente. O perfil de sondagem determina índices de resistência à penetração que caracterizam um solo medianamente compacto, com NSPT na ordem de 9 golpes até a profundidade de 5 m, seguido de aumento gradual de resistência com NSPT variando de 20 a 30 golpes, característico de um solo compacto. Esta classificação é baseada na NBR 7250/82 – Identificação e descrição de amostras de solo obtidas em sondagens de simples reconhecimento.

O ensaio 0,5 SPT teve o mesmo procedimento de execução do SPT convencional. A execução tornou-se mais fácil, pelo fato de apresentar hastes e martelo menos robustos. O tubo de revestimento foi o mesmo utilizado no ensaio SPT convencional. A Figura 5.18 apresenta o equipamento do ensaio 0,5 SPT no momento do ensaio.



Figura 5.18: Execução do ensaio 0,5 SPT.

A execução do ensaio 2,0 SPT foi realizada da mesma forma que os demais ensaios, porém sua execução apresentou dificuldades devido ao peso das hastes e a massa mais elevada do martelo. O tubo de revestimento utilizado no ensaio apresentou diâmetro maior que os demais ensaios. A Figura 5.19 apresenta detalhe da execução do ensaio.



Figura 5.19: Execução do ensaio 2,0 SPT.

5.2.4.2 Ensaio de caracterização do solo

A caracterização do solo foi realizada através da retirada de amostras durante a execução do ensaio SPT convencional nos Furos 02, 03 e 04. A Tabela 5.3 mostra o tipo de ensaio de caracterização realizado nas amostras retiradas dos respectivos furos de sondagem.

Tabela 5.3: Ensaio de caracterização nos furos de sondagem

Furo	Ensaio de caracterização	Profundidade
02	Umidade em campo.	1m a 17 m
03	Granulometria, limite de liquidez e plasticidade, índice de plasticidade, massa específica real dos grãos, diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade.	5m, 11 m e 17 m
04		

Todas as amostras utilizadas nos ensaios de caracterização foram preparadas conforme a NBR 6457/86 – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Para caracterização do solo foram utilizados os ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade e determinação do teor de umidade. A determinação do teor de umidade do solo seguiu os procedimentos descritos pelo anexo da norma NBR 6457/86 – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. A análise granulométrica foi realizada de acordo com os procedimentos descritos pela NBR 7181/84 – Solo – Análise Granulométrica, sendo que nestes ensaios foi utilizado defloculante. Já a determinação da massa específica real dos grãos de solo seguiu o método descrito pela NBR 6508/84 – Solo - Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. E a obtenção dos limites de liquidez e de plasticidade seguiu os métodos descritos nas normas NBR 6459/84 – Determinação do Limite de Liquidez e NBR 7180/84 – Determinação do Limite de Plasticidade, respectivamente.

A Figura 5.20 apresenta o teor de umidade das amostras de solo retiradas em campo, bem como os valores de limites de liquidez e plasticidade. Observando a Figura 5.20 percebe-se que o teor de umidade das amostras retiradas até a profundidade de 9 m fica em torno de 40 % e a partir dos 10 m de profundidade a umidade está em torno de 32 %. Com relação aos valores de limites de liquidez e plasticidade, percebe-se um solo de fraca plasticidade, apresentando limite de liquidez em torno de 40 % e limite de plasticidade na ordem de 35 %. Nota-se claramente que o teor de umidade *in situ* encontra-se próximo ao limite de plasticidade do solo.

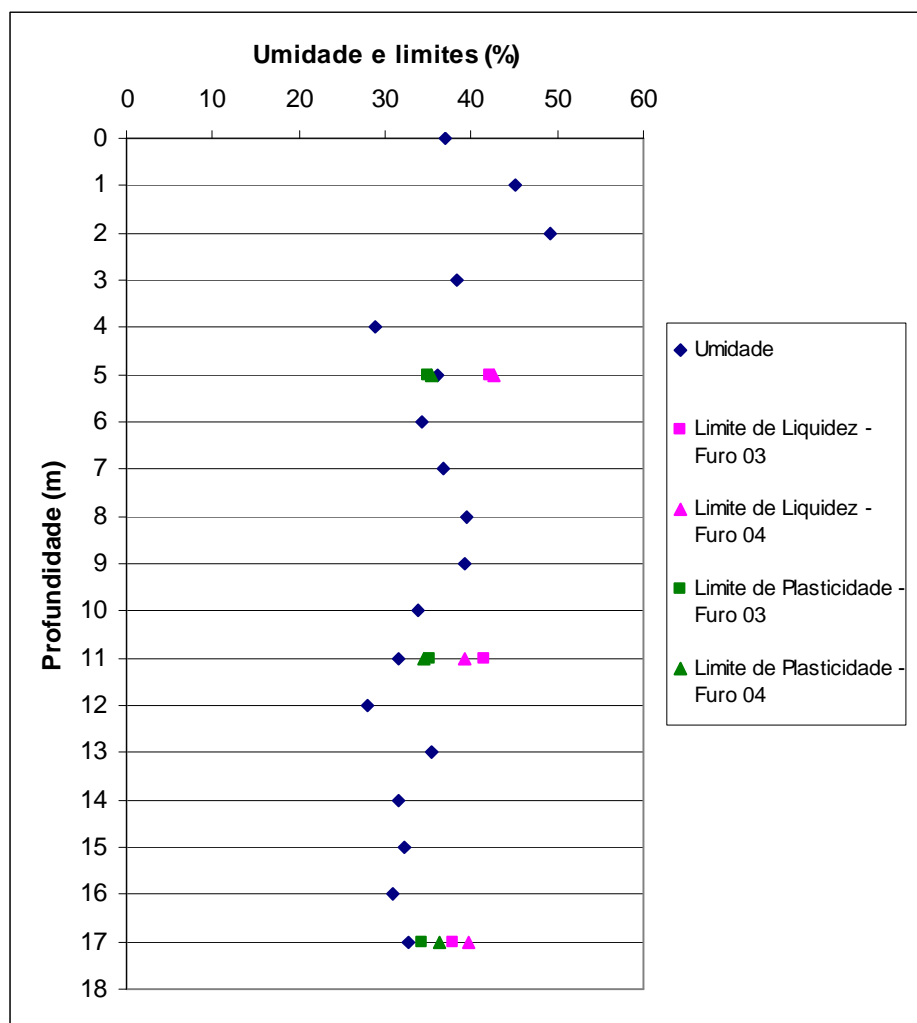


Figura 5.20: Teor de umidade das amostras de solo e limites de liquidez e plasticidade.

As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam a curva granulométrica obtida através do ensaio de peneiramento e sedimentação, conforme a NBR 7181/84 – Solo – Análise Granulométrica, em função do furo de sondagem e profundidade. E a Tabela 5.4 apresenta a porcentagem das frações granulométricas, diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade do solo, obtidas através da curva granulométrica, bem como o limite de liquidez e limite de plasticidade e a densidade real dos grãos, obtidos conforme procedimentos descritos em norma.

Tabela 5.4: Propriedades físicas do solo

Propriedades	Furo de sondagem 03			Furo de sondagem 04		
	5 m	11 m	17 m	5 m	11 m	17 m
Limite de Liquidez (LL)	42,1	41,6	37,9	42,7	39,3	39,8
Limite de Plasticidade (LP)	34,9	35,2	34,3	35,5	34,5	36,4
Índice de Plasticidade (IP)	7,2	6,4	3,6	7,1	4,8	3,5
% de Areia Média ($0,2 < f < 0,6$ mm)	13,4	14,1	22,5	15,0	15,3	17,3
% de Areia Fina ($0,06 < f < 0,2$ mm)	21,4	19,8	15,3	18,1	20,0	23,0
% de Silte ($0,002 < f < 0,06$ mm)	59,5	57,5	48,2	52,4	48,8	51,2
% de Argila ($f < 0,002$ mm)	3,0	5,0	1,8	9,8	11,2	3,8
Densidade Real dos Grãos (G)	2,77	2,77	2,68	2,77	2,77	2,68
Diâmetro Efetivo (D10)	0,0030	0,0030	0,0039	0,002	0,0018	0,0030
Coefficiente de Uniformidade (Cu)	20	20	46	29	33	23

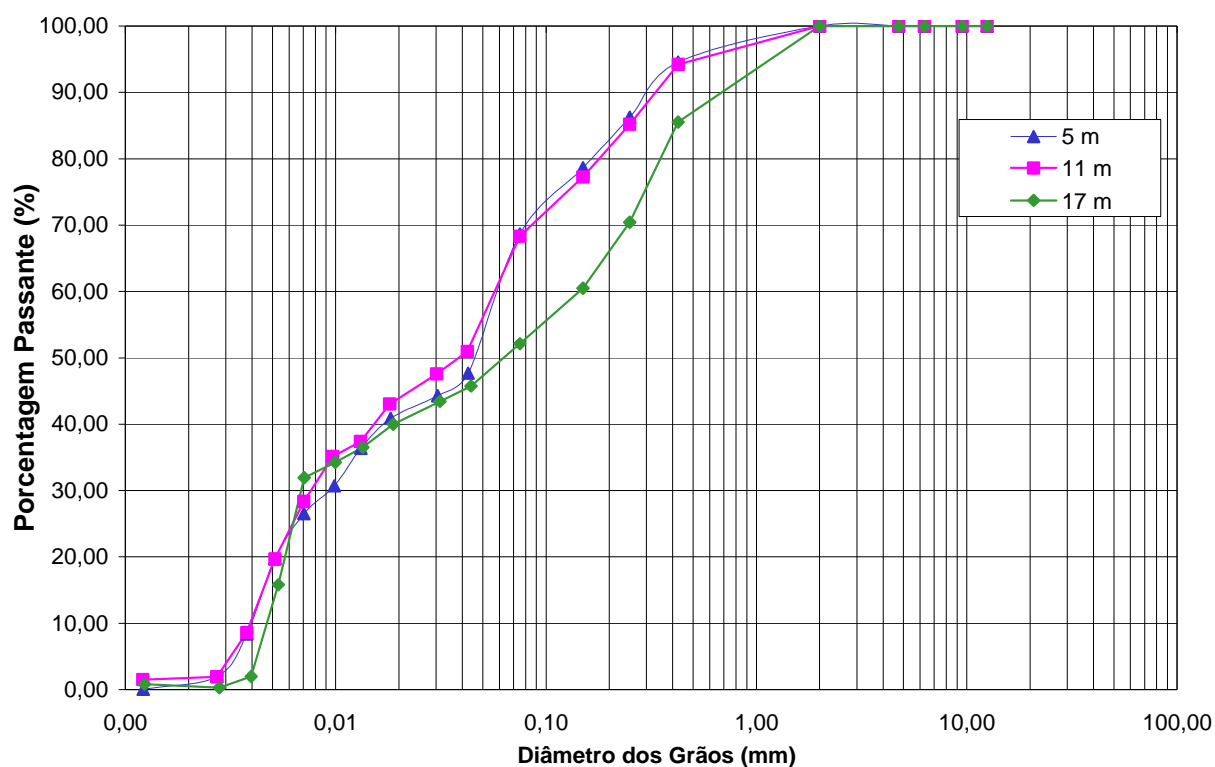


Figura 5.21: Curva granulométrica obtida através do ensaio de peneiramento e sedimentação para o furo de sondagem 03.

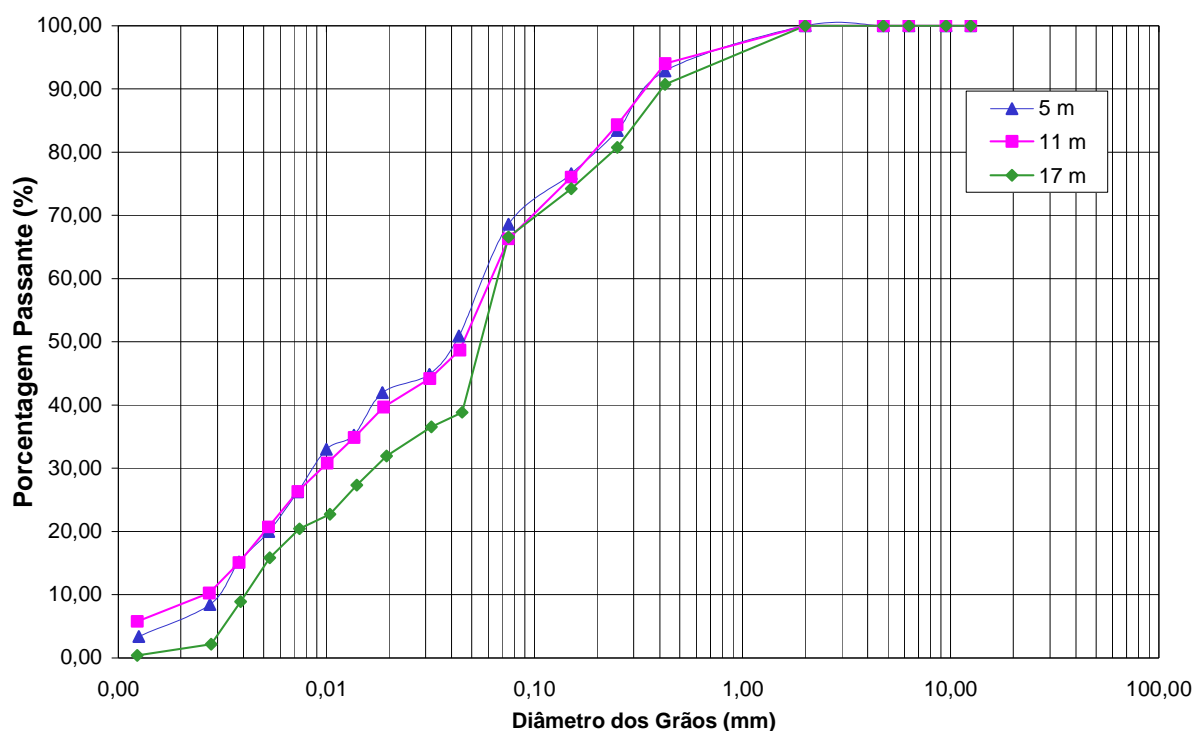


Figura 5.22: Curva granulométrica obtida através do ensaio de peneiramento e sedimentação para o furo de sondagem 04.

Observa-se, através das curvas granulométricas apresentadas nas Figuras 5.21 e 5.22, e também por meio da Tabela 5.4, que este solo pode classificar-se como silte arenoso de fraca plasticidade, de acordo com a NBR 6502/95 – Solo – Rochas e solos – Terminologia.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Ensaios SPT utilizando sistema com cabo de aço

A seguir são apresentados os valores de penetração medidos durante os ensaios de penetração dinâmica com o sistema utilizando cabo de aço. Para cada configuração de ensaio apresenta-se a profundidade de ensaio, seu respectivo furo de sondagem e o tipo de penetração, onde PA é ponta aberta e PF é ponta fechada.

Neste estudo foi necessário adotar um critério para a determinação da penetração $\Delta\rho$. O valor pode ser medido golpe a golpe, tirando-se a média dos vários golpes; pode ainda representar a média para a cravação de 0,30 m do amostrador padrão e, conseqüentemente, a média para a cravação do amostrador de cada configuração de ensaio. Neste caso a determinação do valor

de cravação teve como base o ensaio padrão SPT. No ensaio padrão deve-se cravar 0,30 m para a determinação do valor de penetração (N_{SPT}), enquanto que para os ensaios modificados os valores de penetração são função da escala de comprimento, determinada através da análise dimensional por meio da raiz quadrada da escala de área de cada configuração de ensaio. Portanto, o valor de cravação, em escala, para as demais configurações de ensaio é dado pelo produto da escala de comprimento e o valor de cravação padrão (i. e. $sp.r_i = \text{escala de comprimento} \times 0,30$; Capítulos 3 e 4), conforme demonstrado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Profundidade de cravação do amostrador no solo.

SPT	Escala de Área	Escala de comprimento	$sp.r_i$ (m)
0,5	0,5	0,707	0,20
1,0	1,0	1,000	0,30
1,5	1,5	1,225	0,35
2,0	2,0	1,414	0,40

No campo, descobriu-se experimentalmente, que nem sempre foi possível obter a completa cravação do amostrador pelo fato da resistência do solo aumentar com a profundidade. Dada esta limitação, adotou-se como critério determinar $\Delta\rho$ a partir dos últimos cinco golpes do martelo a cada profundidade de ensaio (i. e. $\Delta\rho = \frac{\text{soma da penetração nos últimos 5 golpes}}{5}$).

As Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam os valores de penetração do ensaio 0,5 SPT, 1,0 SPT e 2,0 SPT, respectivamente.

Tabela 5.6: Valores de penetração do ensaio 0,5 SPT com cabo de aço

Furo de Sondagem	05					
Tipo de Penetração	PA	PF	PA	PF	PA	PF
Profundidade	5,00 m	5,30 m	11,00 m	11,20 m	17,00 m	17,10 m
Penetração	30,0 cm	9,9 cm	20,2 cm	8,9 cm	8,0 cm	7,5 cm
Golpe	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)
1	0,030	0,015	0,030	0,015	0,005	0,010
2	0,020	0,005	0,010	0,005	0,005	0,010
3	0,010	0,005	0,010	0,005	0,008	0,005
4	0,020	0,010	0,015	0,005	0,007	0,010
5	0,010	0,005	0,010	0,005	0,005	0,005
6	0,015	0,010	0,010	0,002	0,008	0,005
7	0,010	0,005	0,005	0,003	0,004	0,005
8	0,010	0,005	0,010	0,005	0,005	0,005
9	0,015	0,010	0,006	0,005	0,005	0,005
10	0,000	0,002	0,009	0,001	0,003	0,005
11	0,010	0,005	0,005	0,004	0,005	0,005
12	0,005	0,006	0,007	0,005	0,005	0,005
13	0,005	0,004	0,008	0,002	0,005	
14	0,010	0,007	0,005	0,003	0,005	
15	0,010	0,005	0,005	0,003	0,005	
16	0,005		0,005	0,002		
17	0,010		0,005	0,003		
18	0,005		0,005	0,003		
19	0,010		0,005	0,003		
20	0,005		0,005	0,002		
21	0,005		0,005	0,003		
22	0,005		0,005	0,003		
23	0,010		0,002	0,003		
24	0,000		0,006			
25	0,010		0,002			
26	0,005		0,005			
27	0,005		0,005			
28	0,005		0,002			
29	0,005					
30	0,005					
31	0,010					
32	0,005					
33	0,002					
34	0,003					
35	0,010					
$\Delta\rho$ (mm) nos últimos 5 golpes =	0,006	0,005	0,004	0,003	0,005	0,004

Tabela 5.7: Valores de penetração do ensaio 1,0 SPT com cabo de aço

Furo de Sondagem	01		02			
Tipo de Penetração	PA	PF	PA	PF	PA	PF
Profundidade de Ensaio	5,10 m	5,55 m	11,40 m	11,75 m	17,00 m	17,45
Penetração	45,0 cm	45,0 cm	34,5 cm	22,5 cm	45,0 cm	5,0 cm
Golpe	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)
1	0,155	0,030	0,060	0,045	0,070	0,010
2	0,035	0,020	0,030	0,022	0,040	0,010
3	0,045	0,020	0,027	0,020	0,025	0,010
4	0,015	0,020	0,023	0,023	0,025	0,010
5	0,020	0,020	0,020	0,010	0,020	0,010
6	0,020	0,015	0,025	0,030	0,015	
7	0,020	0,010	0,015	0,020	0,015	
8	0,025	0,020	0,017	0,010	0,015	
9	0,035	0,017	0,005	0,010	0,010	
10	0,020	0,013	0,023	0,015	0,012	
11	0,015	0,015	0,015	0,010	0,013	
12	0,020	0,015	0,015	0,010	0,010	
13	0,015	0,015	0,012		0,010	
14	0,010	0,010	0,013		0,010	
15		0,010	0,010		0,010	
16		0,010	0,015		0,010	
17		0,015	0,010		0,005	
18		0,010	0,010		0,010	
19		0,015			0,005	
20		0,010			0,010	
21		0,010			0,010	
22		0,010			0,005	
23		0,010			0,010	
24		0,010			0,005	
25		0,000			0,010	
26		0,010			0,007	
27		0,010			0,008	
28		0,010			0,008	
29		0,010			0,007	
30		0,010			0,005	
31		0,000			0,005	
32		0,010			0,010	
33		0,010			0,005	
34		0,010			0,010	
35		0,020			0,005	
$\Delta\rho$ (mm) nos últimos 5 golpes	0,016	0,010	0,012	0,011	0,007	0,010

Tabela 5.8: Valores de penetração do ensaio 2,0 SPT com cabo de aço.

Furo de Sondagem	06			
Tipo de Penetração	PA	PF	PA	PF
Profundidade de Ensaio	5,36 m	5,80 m	11,00 m	11,35 m
Penetração	45,5 cm	27,5 cm	33,0 cm	17 cm
Golpe	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)
1	0,080	0,075	0,045	0,040
2	0,075	0,050	0,045	0,035
3	0,058	0,035	0,035	0,025
4	0,042	0,030	0,032	0,025
5	0,032	0,025	0,028	0,020
6	0,030	0,022	0,025	0,025
7	0,028	0,020	0,025	
8	0,023	0,018	0,025	
9	0,027		0,025	
10	0,020		0,025	
11	0,020		0,020	
12	0,020			
$\Delta\rho$ (mm) nos últimos 5 golpes =	0,022	0,023	0,024	0,026

5.3.2 Ensaio SPT utilizando sistema com corda de sisal

A seguir são apresentados os valores de penetração medidos durante os ensaios dinâmicos com o sistema utilizando corda de sisal, conforme previsto em norma. Para cada configuração de ensaio apresenta-se a profundidade de ensaio, o respectivo furo de sondagem e o tipo de penetração.

As Tabelas 5.9 e 5.10 apresentam os valores de penetração do ensaio 0,5 SPT e 2,0 SPT, respectivamente.

Tabela 5.9: Valores de penetração do ensaio 0,5 SPT com corda de sisal

Furo de Sondagem	04	03	04	03	04	03
Tipo de Penetração	PA	PF	PA	PF	PA	PF
Profundidade de Ensaio	5,00 m	5,50 m	11,00 m	11,45 m	17,00 m	17,45 m
Penetração	21,0 cm	15,0 cm	24,5 cm	10,5 cm	12,8 cm	8,2 cm
Golpe	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)
1	0,035	0,020	0,028	0,015	0,015	0,010
2	0,020	0,015	0,020	0,013	0,015	0,005
3	0,015	0,010	0,012	0,012	0,013	0,010
4	0,013	0,010	0,013	0,010	0,012	0,005
5	0,012	0,010	0,010	0,010	0,008	0,010
6	0,010	0,010	0,012	0,005	0,007	0,005
7	0,015	0,010	0,010	0,010	0,008	0,005
8	0,007	0,010	0,008	0,005	0,007	0,007
9	0,005	0,008	0,007	0,005	0,005	0,005
10	0,011	0,010	0,008	0,005	0,008	0,005
11	0,010	0,007	0,008	0,005	0,005	0,005
12	0,005	0,007	0,004	0,005	0,006	0,005
13	0,007	0,008	0,008	0,005	0,005	0,003
14	0,005	0,005	0,007		0,004	0,002
15	0,010	0,010	0,005		0,005	
16	0,005		0,005		0,005	
17	0,010		0,005			
18	0,005		0,007			
19	0,005		0,006			
20	0,005		0,003			
21			0,006			
22			0,006			
23			0,004			
24			0,004			
25			0,004			
26			0,005			
27			0,005			
28			0,005			
29			0,002			
30			0,003			
31			0,005			
32			0,000			
33			0,005			
34			0,005			
$\Delta\rho$ (mm) nos últimos 5 golpes =	0,006	0,007	0,004	0,005	0,005	0,004

Tabela 5.10: Valores de penetração do ensaio 1,0 SPT com corda de sisal

Furo de Sondagem	03	04	03	03	04	03	03	04	03
Tipo de Penetração	PA	PA	PF	PA	PA	PF	PA	PA	PF
Profundidade de Ensaio	5,05 m	5,20 m	5,70 m	11,10 m	11,50 m	11,60 m	17,10 m	17,50 m	17,80 m
Penetração	45,0 cm	45,0 cm	43,0 cm	45,0 cm	45,0 cm	40,0 cm	45,0 cm	45,0 cm	25,0 cm
Golpe	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)	$\Delta\rho$ (mm)
1	0,100	0,085	0,095	0,068	0,060	0,055	0,115	0,073	0,035
2	0,050	0,035	0,035	0,042	0,040	0,045	0,070	0,035	0,037
3	0,040	0,035	0,020	0,030	0,035	0,035	0,055	0,030	0,023
4	0,035	0,028	0,035	0,025	0,018	0,030	0,040	0,025	0,020
5	0,030	0,024	0,025	0,023	0,032	0,020	0,030	0,020	0,015
6	0,027	0,023	0,025	0,022	0,020	0,023	0,025	0,022	0,015
7	0,026	0,022	0,010	0,022	0,020	0,022	0,022	0,018	0,020
8	0,022	0,020	0,030	0,023	0,018	0,015	0,018	0,017	0,015
9	0,020	0,018	0,005	0,020	0,017	0,007	0,020	0,015	0,010
10	0,020	0,023	0,020	0,015	0,017	0,023	0,007	0,015	0,015
11	0,020	0,010	0,020	0,017	0,016	0,017	0,023	0,020	0,015
12	0,020	0,027	0,015	0,018	0,017	0,013	0,020	0,008	0,010
13	0,015	0,015	0,015	0,015	0,013	0,017	0,005	0,012	0,010
14	0,020	0,017	0,015	0,015	0,015	0,013		0,015	0,010
15	0,005	0,013	0,020	0,015	0,012	0,010		0,010	
16		0,015	0,015	0,012	0,014	0,010		0,010	
17		0,015	0,015	0,013	0,013	0,015		0,015	
18		0,018	0,015	0,015	0,012	0,010		0,010	
19		0,007		0,013	0,011	0,010		0,010	
20				0,010	0,013	0,010		0,012	
21				0,014	0,010			0,010	
22				0,003	0,010			0,010	
23					0,012			0,010	
24					0,005			0,008	
25								0,010	
26								0,010	
$\Delta\rho$ (mm) nos últimos 5 golpes =	0,016	0,014	0,016	0,011	0,010	0,011	0,015	0,010	0,012

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados experimentais é baseada no referencial teórico proposto por Odebrecht (2003) e na abordagem numérica desenvolvida por Lobo *et al* (2007).

Uma vez realizado os ensaios e determinado o valor de $\Delta\rho$ experimentalmente, foi possível, de acordo com cada configuração, quantificar a energia absorvida pelo solo E_s através da equação (5.1), proposta por Odebrecht (2003). Com isto é possível determinar a força

dinâmica F_d , calculada pela equação (5.2), e a tensão de ruptura do solo σ_{rup} , através da razão entre a força dinâmica F_d e a área de ponta do amostrador.

$$E_s = \eta_3 [\eta_1 (0,75 + \Delta\rho) M_m g + \eta_2 \Delta\rho M_h g] \quad (5.1)$$

$$F_d = \frac{E_s}{\Delta\rho} \quad (5.2)$$

onde: M_m = massa do martelo;

g = aceleração da gravidade;

M_h = massa da haste;

$\Delta\rho$ = penetração permanente do amostrador devido à aplicação de um golpe;

η_1 = eficiência referente à parcela do martelo;

η_2 = perdas ao longo das hastes;

η_3 = eficiência do sistema.

Os registros de penetração medidos experimentalmente são comparados às penetrações calculadas numericamente através do método de elementos discretos proposto por Lobo *et al* (2007). As medidas de penetração adquiridas experimentalmente são usadas na equação (5.1) para calcular as componentes de energia. Assim, faz-se a distinção entre valores de energia calculados analiticamente (usando a equação 5.1 e os valores medidos de $\Delta\rho$) e energia prevista (determinada a partir da simulação). A partir daí, utilizando a equação (5.2), é possível realizar a comparação entre os valores de força dinâmica F_d , e conseqüentemente determinar o valor de tensão de ruptura do solo σ_{rup} , através da razão entre a força dinâmica F_d e a área de ponta do amostrador, para ambos os casos.

Nas análises, os cálculos foram realizados como se não existissem perdas portanto η_1 , η_2 e η_3 apresentam valores unitários. Este critério foi adotado pela impossibilidade de determinar eficiências reais para cada configuração de ensaio. Portanto, apresentam-se os resultados de tensão de ruptura do solo não considerando valores de eficiência e sugere-se, para trabalhos futuros, a usinagem de células de carga para cada configuração de ensaio, tornando possível a determinação destes valores de eficiência, proporcionando comparações mais consistentes. Na

análise são apresentados, separadamente, os resultados de penetração em ponta aberta e ponta fechada, considerando-se em cada caso o uso de corda de sisal ou cabo de aço.

No caso particular do ensaio SPT (ensaio padronizado), as eficiências η_1 , η_2 e η_3 foram medidas por Odebrecht (2003). Somente neste caso é possível fazer-se uma comparação real entre medições e previsões. Para o cálculo utilizou-se os valores sugeridos por Odebrecht (2003): η_1 = eficiência referente à parcela do martelo = 0,761; η_2 = perdas ao longo das hastes = 1; η_3 = eficiência do sistema = 0,907-0,0066l.

No caso das simulações numéricas realizadas no programa proposto por Lobo *et al* (2007) utilizou-se a calibração do modelo realizada por Carrapatoso (2007)³, por se tratar de um estudo em solos residuais. Para calibrar o programa e quantificar as perdas de energia durante a propagação da onda de tensão ao longo do sistema, Carrapatoso (2007) realizou uma análise através de estudos de casos em locais de ocorrência de solos residuais, na cidade de Joinville – SC. Foram selecionados locais submetidos a estudos geotécnicos nos quais foram executados ensaios SPT. A simulação foi realizada com base nos dados publicados de resistência dos materiais prospectados.

Primeiramente realizou-se a calibração do modelo de reação do solo para solos residuais e posteriormente a calibração das perdas do sistema, para assim determinar os parâmetros necessários ao modelo proposto e adotados na presente pesquisa:

- a) $G_o/G = 50$, onde G é o módulo cisalhante e G_o o módulo de deformabilidade do solo;
- b) ZtH e $ZtR = 1 \times 10^{-6}$, relação de amortecimento ZtH e ZtR na haste e no martelo, respectivamente, que são grandezas que estabelecem a dissipação de energia que cada elemento irá sofrer durante a propagação da onda de tensão.

³ Esta calibração foi desenvolvida em um trabalho de Iniciação Científica sob minha supervisão, conjuntamente com Lobo.

Todos os detalhes da calibração do programa podem ser analisados na publicação de Lobo (2007) e Carrapatoso (2007). Assim, a partir destas considerações, realizou-se as simulações numéricas das configurações de ensaios e a seguir procedeu-se à interpretação dos resultados, realizada através da comparação entre valores experimentais e os valores previstos numericamente.

5.4.1 Penetração em ponta aberta

5.4.1.1 Ensaio dinâmico utilizando sistema com cabo de aço

Os resultados dos ensaios dinâmicos realizados na campanha experimental penetrando de ponta aberta, utilizando o sistema onde a elevação do martelo até a altura de queda desejada foi realizada com o auxílio de um cabo de aço, são apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Resultados experimentais dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta aberta, utilizando o sistema de elevação com cabo de aço.

SPT	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Área amostrador (m ²)	Energia calculada* (J)	$\Delta\rho$ medido (m)	F_d calculada** (kN)	σ_{rup} calculada*** (MPa)
0,50	5,00	6,50	0,001018	114,590	0,006	19,098	18,763
	11,00	12,50		114,257	0,004	28,564	28,063
	17,00	19,00		114,968	0,005	22,994	22,590
1,00	5,10	6,00	0,002027	490,983	0,016	30,686	15,140
	11,40	12,00		489,321	0,012	42,183	20,812
	17,00	18,00		486,038	0,007	69,434	34,257
1,00 com perdas	5,10	6,00	0,002027	324,621	0,016	20,289	10,010
	11,40	12,00		308,980	0,012	26,636	13,142
	17,00	18,00		292,164	0,007	41,738	20,593
2,00	5,36	6,00	0,004185	1392,058	0,022	63,275	15,118
	11,00	12,00		1409,042	0,024	58,710	14,027
	17,00	18,00		-	-	-	-

$$* E_s = \eta_3 [\eta_1 (0,75 + \Delta\rho) M_m g + \eta_2 \Delta\rho M_h g]$$

$$** F_d = \frac{E_s}{\Delta\rho}$$

$$*** \sigma_{rup} = \frac{F_d}{A}$$

A Tabela 5.12 apresenta os resultados previstos na simulação numérica dos ensaios dinâmicos penetrando de ponta aberta, utilizando o sistema de elevação com cabo de aço.

Tabela 5.12: Resultados previstos dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta aberta, utilizando o sistema de elevação com cabo de aço.

SPT	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Área amostrador (m ²)	Energia prevista (J)	$\Delta\rho$ previsto (m)	F_d Calculada** (kN)	σ_{rup} calculada*** (MPa)
0,50	5,00	6,50	0,001018	146,301	0,019	7,461	7,329
	11,00	12,50		139,602	0,012	10,915	10,723
	17,00	19,00		109,274	0,007	14,082	13,834
1,00	5,10	6,00	0,002027	662,519	0,041	15,899	7,844
	11,40	12,00		648,282	0,027	23,773	11,729
	17,00	18,00		612,183	0,020	30,427	15,012
1,0 com perdas	5,10	6,00	0,002027	385,480	0,024	15,594	3,726
	11,40	12,00		375,003	0,016	23,278	5,562
	17,00	18,00		330,196	0,011	29,561	7,063
2,00	5,36	6,00	0,004185	1640,258	0,051	31,665	7,566
	11,00	12,00		1568,911	0,034	45,648	10,906
	17,00	18,00		-	-	-	-

$$** F_d = \frac{E_s}{\Delta\rho}$$

$$*** \sigma_{rup} = \frac{F_d}{A}$$

5.4.1.2 Ensaio dinâmico utilizando sistema com corda de sisal

Os ensaios dinâmicos realizados quando da utilização do sistema de elevação por corda de sisal, têm seus resultados apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Resultados experimentais dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta aberta, utilizando o sistema de elevação com corda de sisal.

SPT	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Área Amostrador (m ²)	Energia calculada* (J)	$\Delta\rho$ medido (m)	F_d calculada** (kN)	σ_{rup} calculada*** (MPa)
0,50	5,00	6,50	0,001018	114,590	0,006	19,098	18,763
	11,00	12,50		114,113	0,004	31,698	31,141
	17,00	19,00		114,968	0,005	22,994	22,590
1,00 – Furo 03	5,05	6,00	0,002027	491,482	0,016	30,718	15,155
	11,10	12,00		489,434	0,011	44,494	21,953
	17,10	18,00		496,358	0,015	33,091	16,326
1,00 – Furo 04	5,20	6,00	0,002027	489,495	0,014	35,992	17,758
	11,50	12,00		488,416	0,010	48,842	24,098
	17,50	18,00		489,834	0,010	51,024	25,174
1,00 – Furo 03 com perdas	5,05	6,00	0,002027	325,054	0,016	20,316	10,023
	11,10	12,00		309,149	0,011	28,104	13,866
	17,10	18,00		299,337	0,015	19,956	9,846
1,00 – Furo 04 com perdas	5,20	6,00	0,002027	323,648	0,014	23,798	11,741
	11,50	12,00		308,433	0,010	30,843	15,218
	17,50	18,00		294,844	0,010	30,713	15,153

$$* E_s = \eta_3 [\eta_1 (0,75 + \Delta\rho) M_m g + \eta_2 \Delta\rho M_h g]$$

$$** F_d = \frac{E_s}{\Delta\rho}$$

$$*** \sigma_{rup} = \frac{F_d}{A}$$

Da mesma forma que para os ensaios utilizando sistema com cabo de aço, a análise está baseada na comparação entre os ensaios realizados em campo e as simulações numéricas. A Tabela 5.14 apresenta o resultado da simulação numérica dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta aberta, utilizando o sistema de elevação com corda de sisal.

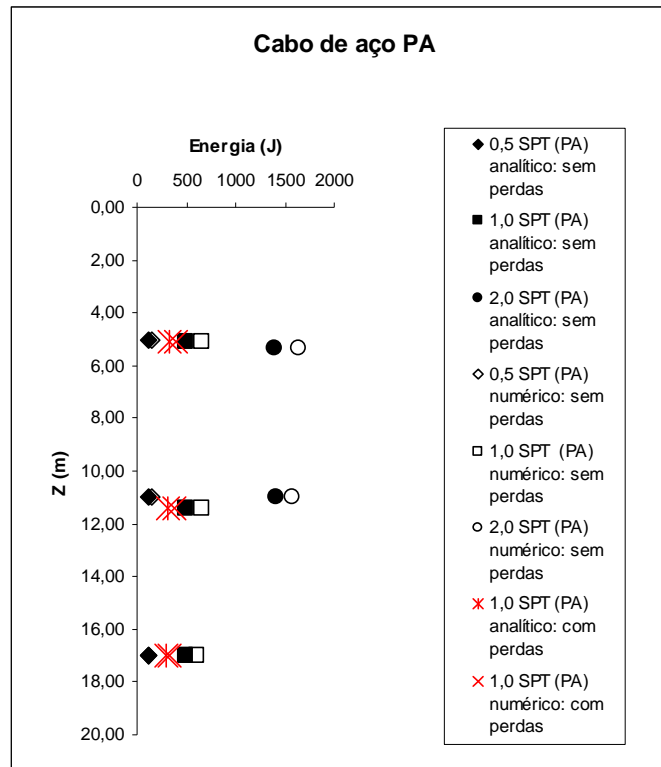
Tabela 5.14: Resultados previstos dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta aberta, utilizando o sistema de elevação com corda de sisal.

SPT	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Área mostrador (m ²)	Energia prevista (J)	$\Delta\rho$ previsto (m)	F_d Calculada** (kN)	σ_{rup} calculada*** (MPa)
0,50	5,00	6,50	0,001018	146,301	0,019	7,461	7,329
	11,00	12,50		139,602	0,012	10,915	10,723
	17,00	19,00		109,274	0,007	14,082	13,834
1,00 – Furo 03	5,05	6,00	0,002027	664,478	0,041	15,840	7,815
	11,10	12,00		649,052	0,027	23,491	11,590
	17,10	18,00		607,356	0,020	30,353	14,975
1,00 – Furo 04	5,20	6,00	0,002027	659,039	0,041	16,031	7,909
	11,50	12,00		647,441	0,027	23,891	11,787
	17,50	18,00		615,817	0,019	30,899	15,245
1,00 – Furo 03 com perdas	5,05	6,00	0,002027	377,501	0,024	15,529	3,710
	11,10	12,00		374,747	0,016	22,948	5,483
	17,10	18,00		325,584	0,010	29,707	7,098
1,00 – Furo 04 com perdas	5,20	6,00	0,002027	386,635	0,024	15,781	3,771
	11,50	12,00		379,001	0,016	23,424	5,597
	17,50	18,00		349,373	0,011	30,407	7,265

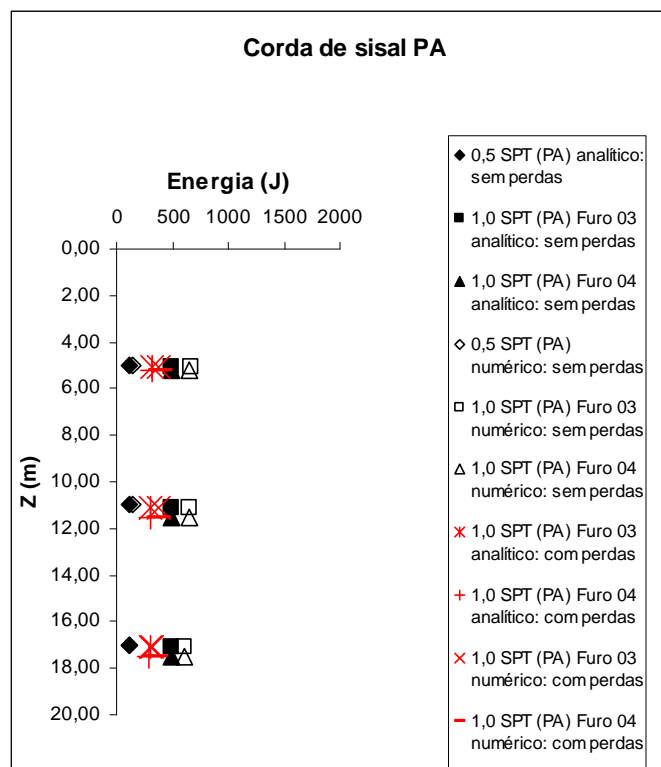
$$** F_d = \frac{E_s}{\Delta\rho}$$

$$*** \sigma_{rup} = \frac{F_d}{A}$$

As Figuras 5.23 a 5.26 ilustram, respectivamente, energia, penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$, força dinâmica F_d e a tensão de ruptura dos ensaios dinâmicos realizados na campanha experimental e simulação numérica penetrando em ponta aberta. Nesta comparação utilizou-se o sistema de elevação com o auxílio de um cabo de aço e corda de sisal, plotados contra a profundidade Z.

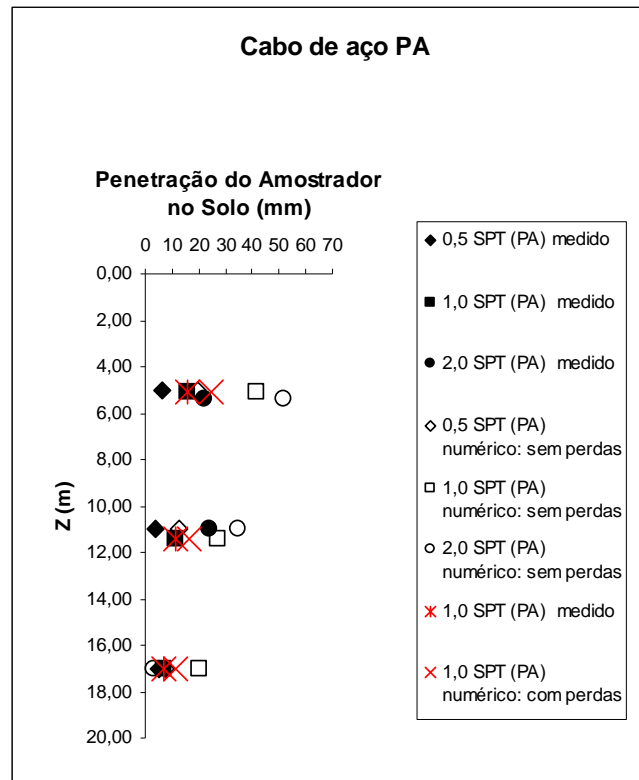


(a) cabo de aço

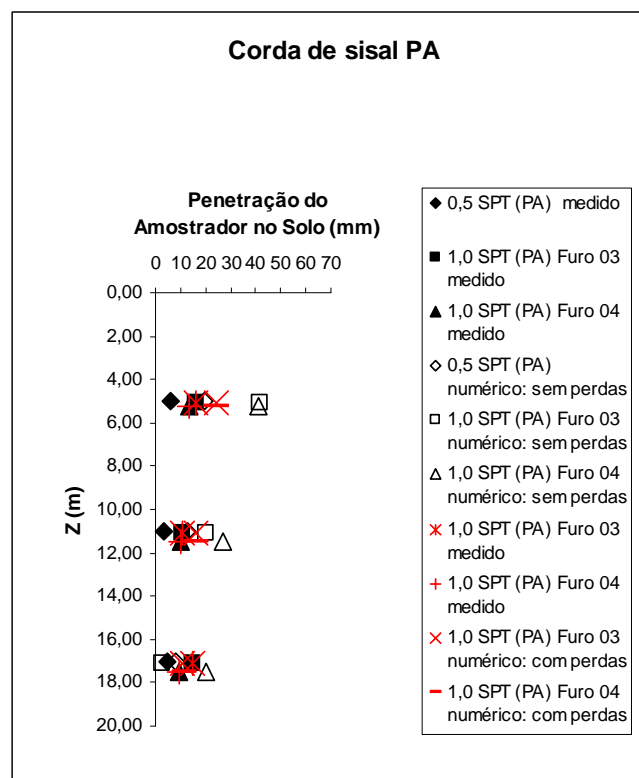


(b) corda de sisal

Figura 5.23: Energia absorvida pelo solo (ensaios penetrando em ponta aberta).

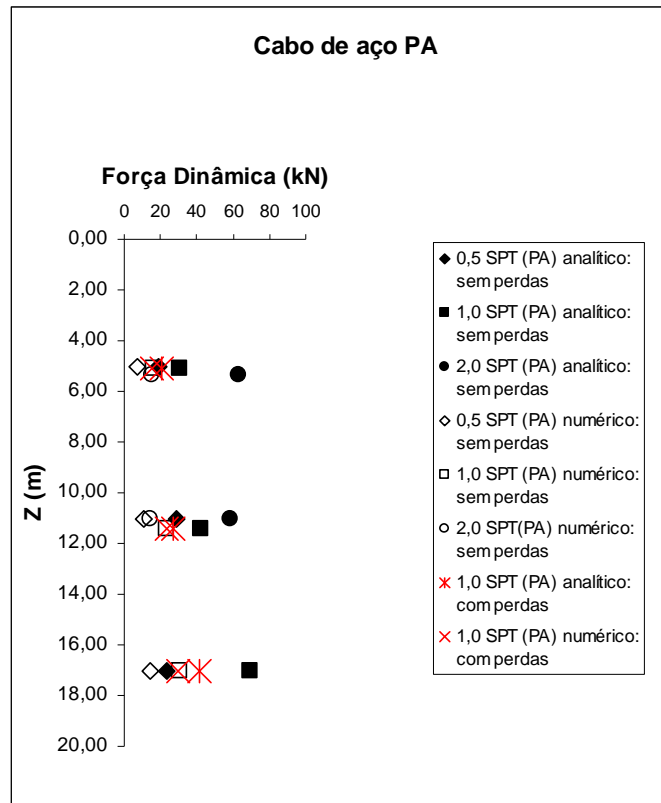


(a) cabo de aço

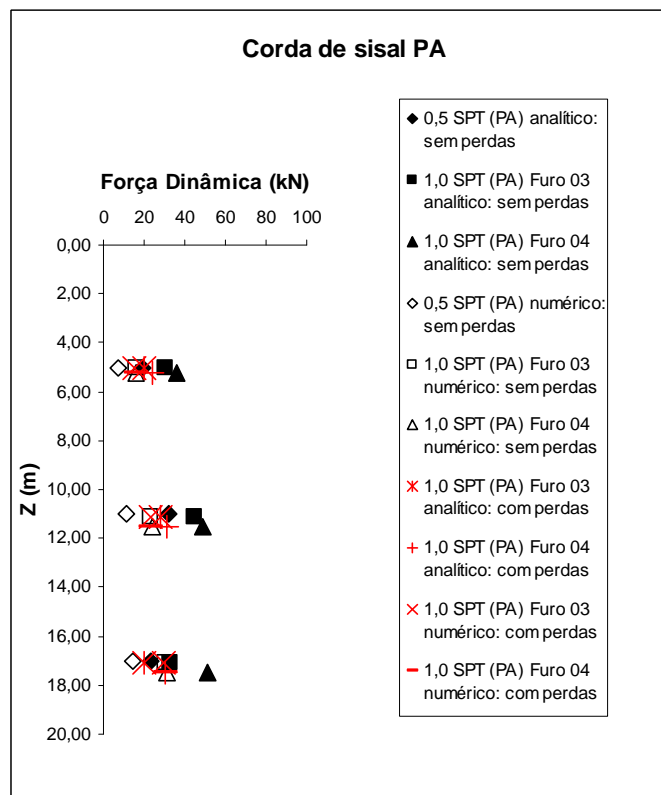


(b) corda de sisal

Figura 5.24: Penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$ (ensaios penetrando em ponta aberta).

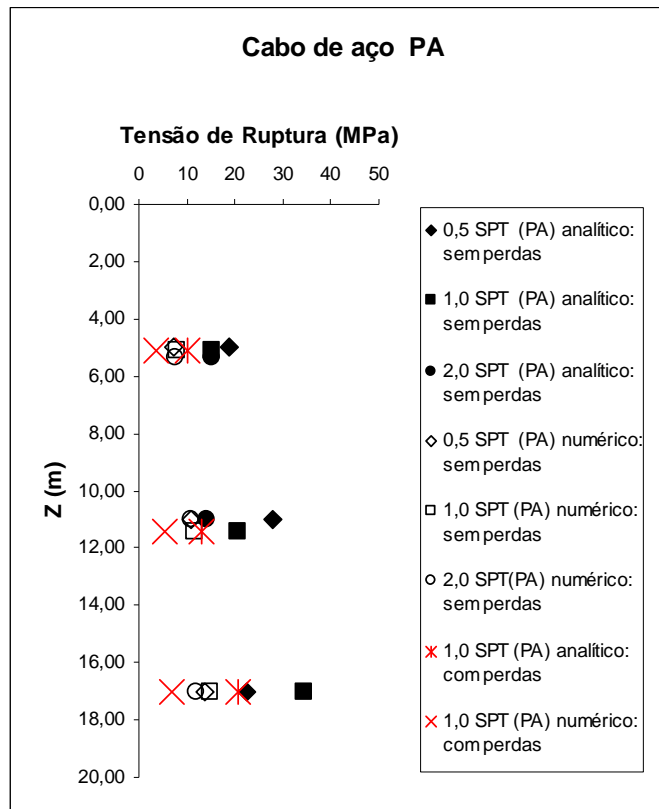


(a) cabo de aço

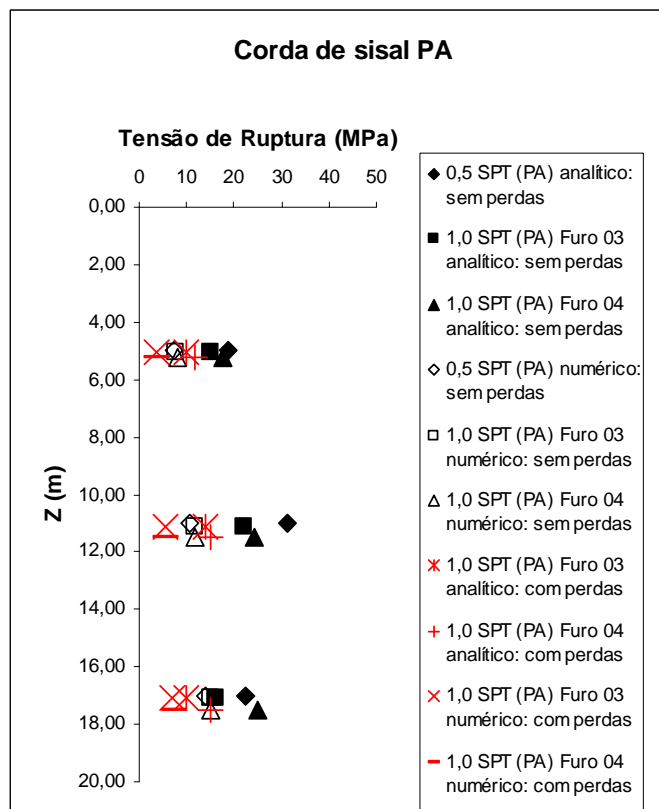


(b) corda de sisal

Figura 5.25: Força dinâmica F_d (ensaios penetrando em ponta aberta).



(a) cabo de aço



(b) corda de sisal

Figura 5.26: Tensão de ruptura (ensaios penetrando em ponta aberta).

Observando as Figura 5.23 percebe-se que a energia mantém-se praticamente constante ao longo da profundidade, tanto para o ensaio que utiliza sistema com cabo de aço quanto para o sistema com corda de sisal. Visualiza-se também que a energia transmitida para o solo aumenta de acordo com o aumento da geometria do ensaio. Isto ocorre devido a maior massa dos equipamentos, que leva a um acréscimo de energia absorvida pelo solo. Na comparação entre valores medidos e as simulações numéricas observa-se alguma dispersão nos resultados, sendo que os valores medidos são menores que os simulados. Isto ocorre porque na simulação de um evento dinâmico sem as perdas inseridas não há amortecimento e o sistema transmite mais energia. Para o ensaio 0,5 SPT os valores medidos apresentam um valor de energia aproximadamente 20 % menor que os ensaios simulados, no ensaio 1,0 SPT ela é aproximadamente 25 % menor e para o ensaio 2,0 SPT a energia medida é da ordem de 15 % a menos que os ensaios simulados, tanto para o sistema com cabo de aço quanto para o que utiliza corda de sisal. Para o ensaio 1,0 SPT, onde as perdas estão inseridas, percebe-se que o valor de energia medida tem uma leve redução em relação aos ensaios onde as perdas não estão inseridas. Tanto para o sistema com cabo de aço quanto para o que utiliza corda de sisal, a energia medida tem uma redução em torno de 15 % em relação ao valor do ensaio simulado. É interessante observar-se a ótima previsão das energias calculadas a partir das medidas de Δp e simuladas numericamente, quando da inserção das perdas.

No que diz respeito à penetração do amostrador no solo, a Figura 5.24 demonstra que, tanto para o sistema com cabo de aço quanto para o sistema com corda de sisal, a penetração diminuiu com o aumento da profundidade de ensaio, o que já é esperado, porque quanto maior a profundidade, maior o grau de confinamento a que o solo está submetido. Para o ensaio 2,0 SPT, com sistema de cabo de aço as diferenças são menores, talvez pelo fato do equipamento ser mais robusto. Verifica-se também que os valores de penetração aumentam de acordo com a configuração de ensaio a uma mesma profundidade. Isto ocorre devido a característica geométrica dos equipamentos que apresentam massas crescentes, gerando um aumento da energia transmitida ao solo e, conseqüentemente, maior penetração.

Nota-se que a simulação numérica forneceu valores de penetração ligeiramente superiores aos medidos em campo. Percebe-se também, que as penetrações calculadas pela simulação numérica diminuem com a profundidade, apresentando uma tendência de aproximação com as penetrações medidas. Este comportamento pode ser explicado devido a maior heterogeneidade dos depósitos mais próximos à superfície, uma vez que são adotados

parâmetros médios de comportamento deste material para simular sua resistência. Outro fator que pode ter ocasionado estas diferenças é o desconhecimento da eficiência do martelo.

Tanto para os ensaios utilizando cabo de aço quanto para os ensaios com corda de sisal as penetrações medidas apresentam valores menores que as simuladas. Para o ensaio 0,5 SPT esta redução está na ordem de 65 %, para o ensaio 1,0 SPT é de 60 % e o ensaio 2,0 SPT apresenta uma redução de aproximadamente 55 % em relação às simulações. Porém, na modelagem do 1,0 SPT, quando comparando resultados com as eficiências inseridas na modelagem, nota-se que os valores medidos em campo apresentam uma redução de 35 % em relação aos valores previstos tanto no ensaio utilizando cabo de aço quanto corda de sisal. Também, neste caso, a simulação numérica superestima as penetrações medidas, mesmo quando as eficiências são consideradas nas análises. Mesmo que as penetrações apresentem dispersões não afetam substancialmente as comparações entre energias (conforme demonstrado na Figura 5.23). Isto decorre do fato das penetrações medidas serem pequenas e, portanto as parcelas de energia calculadas em função da penetração são pequenas quando comparadas a parcela decorrente da altura de queda do martelo.

A força dinâmica de reação do solo à cravação do amostrador SPT, conforme Figura 5.25, aumenta com a configuração do ensaio e, na maioria dos casos, ao longo da profundidade, ocorrendo tanto para o ensaio com sistema utilizando cabo de aço quanto para o que utiliza corda de sisal. Isto ocorre pelo fato deste valor estar relacionado com a energia absorvida pelo solo, que aumenta com a configuração de ensaio e mantém-se constante ao longo da profundidade e também com o valor de penetração, que diminui ao longo da profundidade, aumentando ou diminuindo de acordo com a configuração de ensaio. Em todas as configurações de ensaio a força dinâmica determinada experimentalmente apresenta um valor superior aos ensaios simulados. No ensaio 0,5 SPT a força dinâmica teve um aumento de 155 % em relação ao valor simulado, para o ensaio 1,0 SPT este aumento é em torno de 90 %, já o ensaio 2,0 SPT apresentou um acréscimo de 95 % em relação ao valor simulado. Este fato ocorre tanto para os ensaios com sistema de elevação do martelo com cabo de aço quanto para o que utiliza corda de sisal. Comparando os resultados das simulações com perdas e resultados de ensaios em campo, percebe-se um aumento em torno de 35 %, tanto para o sistema com cabo de aço quanto para o que utiliza corda de sisal.

A Figura 5.26 apresenta a tensão de ruptura do solo. Avaliando os ensaios experimentais e simulados, percebe-se que esta aumenta ao longo da profundidade de ensaio e, para as

configurações de ensaios simulados numericamente nas mesmas profundidades, apresenta valores praticamente iguais. Para os ensaios realizados em campo verifica-se que a tensão de ruptura não se mantém totalmente constante para todas as configurações de ensaio, e também não apresenta valores iguais nas profundidades ensaiadas. Isso ocorre, em parte, devido aos fatores de escala envolvidos no processo de cravação do amostrador no solo.

Esta diferença ocorre porque a simulação numérica foi realizada sem considerar a existência de perdas, como especificado anteriormente, diferentemente do que ocorre experimentalmente. Em campo as perdas existem e condicionam a magnitude da energia contida no martelo, nas hastes e em todo o sistema de execução do ensaio, devendo ser quantificadas para assim ter uma análise mais precisa de resultados. Porém, como este processo não foi possível de ser realizado nesta etapa, para as três profundidades analisadas ocorreram diferenças nos valores de tensão. Percebe-se que os resultados experimentais são maiores que os resultados apresentados pela simulação numérica, sendo da ordem de 135 % para o ensaio 0,5 SPT, 100 % para o ensaio 1,0 SPT e 95 % maior para o ensaio 2,0 SPT, tanto para os ensaios utilizando sistema de elevação do martelo com cabo de aço quanto para o sistema com corda de sisal.

Porém, quando analisando o ensaio 1,0 SPT com as perdas inseridas, percebe-se que a consideração das perdas não melhora substancialmente a comparação entre as medidas experimentais e as previsões numéricas, sendo que o resultados experimentais são aproximadamente 170 % maiores que os simulados, independentemente do uso de cabo de aço ou corda de sisal. As diferenças podem estar atribuídas a erros na modelagem numérica ou efeitos de escala, ou alternativamente, à dispersão natural nas medidas do ensaio.

5.4.2 Penetração em ponta fechada

5.4.2.1 Ensaios dinâmicos utilizando sistema com cabo de aço

Na Tabela 5.15 têm-se os ensaios dinâmicos realizados na campanha experimental penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com o auxílio de um cabo de aço.

Tabela 5.15: Resultados experimentais dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com cabo de aço.

SPT	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Área amostrador (m ²)	Energia calculada* (J)	$\Delta\rho$ medido (m)	F_d calculada** (kN)	σ_{rup} calculada*** (MPa)
0,50	5,30	6,50	0,001018	114,412	0,005	21,187	20,815
	11,20	12,50		113,824	0,003	40,652	39,938
	17,10	19,00		114,538	0,004	28,634	28,132
1,00	5,55	6,00	0,002027	486,203	0,010	48,620	23,988
	11,75	12,00		488,748	0,011	44,432	21,922
	17,45	18,00		489,382	0,010	48,938	24,145
1,00 com perdas	5,55	6,00	0,002027	321,268	0,010	32,127	15,851
	11,75	12,00		308,581	0,011	28,053	13,841
	17,45	18,00		294,439	0,010	29,444	14,527
2,00	5,80	6,00	0,004185	1393,798	0,023	60,600	14,479
	11,35	12,00		1413,648	0,026	54,371	12,991
	17,00	18,00		-	-	-	-

$$* E_s = \eta_3 [\eta_1 (0,75 + \Delta\rho) M_m g + \eta_2 \Delta\rho M_h g]$$

$$** F_d = \frac{E_s}{\Delta\rho}$$

$$*** \sigma_{rup} = \frac{F_d}{A}$$

Da mesma forma que para os ensaios penetrando em ponta aberta, a análise está inserida na comparação entre os ensaios realizados em campo e simulações numéricas. A Tabela 5.15 apresenta o resultado da simulação dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com cabo de aço.

Tabela 5.16: Resultados previstos nos ensaios dinâmicos penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com cabo de aço.

SPT	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Área amostrador (m ²)	Energia prevista (J)	$\Delta\rho$ previsto (m)	F_d calculada** (kN)	σ_{rup} calculada*** (MPa)
0,50	5,30	6,50	0,001018	143,564	0,018	7,608	7,474
	11,20	12,50		139,686	0,012	11,025	10,831
	17,10	19,00		112,552	0,007	14,283	14,032
1,00	5,55	6,00	0,002027	689,195	0,041	16,508	8,145
	11,75	12,00		651,350	0,026	24,133	11,907
	17,45	18,00		620,140	0,020	30,899	15,245
1,00 com perdas	5,55	6,00	0,002027	377,073	0,023	16,149	3,858
	11,75	12,00		376,761	0,015	23,861	5,701
	17,45	18,00		326,057	0,010	30,303	7,240
2,00	5,80	6,00	0,004185	1610,086	0,049	32,666	7,805
	11,35	12,00		1569,482	0,033	46,284	11,058
	17,00	18,00		-	-	-	-

$$** F_d = \frac{E_s}{\Delta\rho}$$

$$*** \sigma_{rup} = \frac{F_d}{A}$$

5.4.2.2 Ensaios dinâmicos utilizando sistema com corda de sisal

Na Tabela 5.17 têm-se os ensaios dinâmicos realizados na campanha experimental penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com o auxílio de corda de sisal.

Tabela 5.17: Resultados experimentais dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com corda de sisal.

SPT	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Área amostrador (m ²)	Energia calculada* (J)	$\Delta\rho$ medido (m)	F_d calculada** (kN)	σ_{rup} calculada*** (MPa)
0,50	5,50	6,50	0,001018	115,004	0,007	15,541	15,268
	11,45	12,50		114,618	0,005	22,924	22,521
	17,45	19,00		114,538	0,004	28,634	28,132
1,00	5,70	6,00	0,002027	492,310	0,017	28,959	14,288
	11,60	12,00		489,434	0,011	44,494	21,953
	17,80	18,00		492,734	0,012	41,061	20,259
1,00 com perdas	5,70	6,00	0,002027	325,639	0,017	19,155	9,451
	11,60	12,00		309,149	0,011	28,104	13,866
	17,80	18,00		296,841	0,012	24,737	12,205

$$* E_s = \eta_3 [\eta_1 (0,75 + \Delta\rho) M_m g + \eta_2 \Delta\rho M_h g]$$

$$** F_d = \frac{E_s}{\Delta\rho}$$

$$*** \sigma_{rup} = \frac{F_d}{A}$$

A Tabela 5.18 apresenta o resultado da simulação dos ensaios dinâmicos penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com corda de sisal.

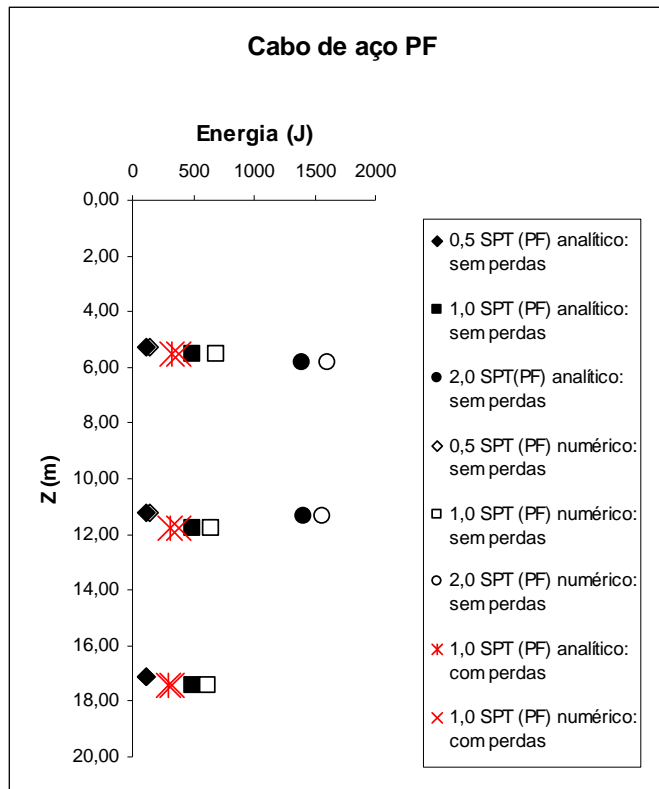
Tabela 5.18: Resultados previstos nos ensaios dinâmicos penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com corda de sisal.

SPT	Z (m)	Comprimento da haste (m)	Área amostrador (m ²)	Energia prevista (J)	$\Delta\rho$ previsto (m)	F_d calculada** (kN)	σ_{rup} calculada*** (MPa)
0,50	5,50	6,50	0,001018	143,074	0,018	7,725	7,590
	11,45	12,50		140,421	0,012	11,171	10,975
	17,45	19,00		108,766	0,007	14,444	14,191
1,00	5,70	6,00	0,002027	679,033	0,040	16,680	8,229
	11,60	12,00		646,910	0,026	22,468	11,085
	17,80	18,00		606,190	0,019	31,151	15,369
1,00 com perdas	5,70	6,00	0,002027	378,813	0,023	16,335	3,903
	11,60	12,00		375,054	0,015	23,485	5,611
	17,80	18,00		320,668	0,010	30,627	7,318

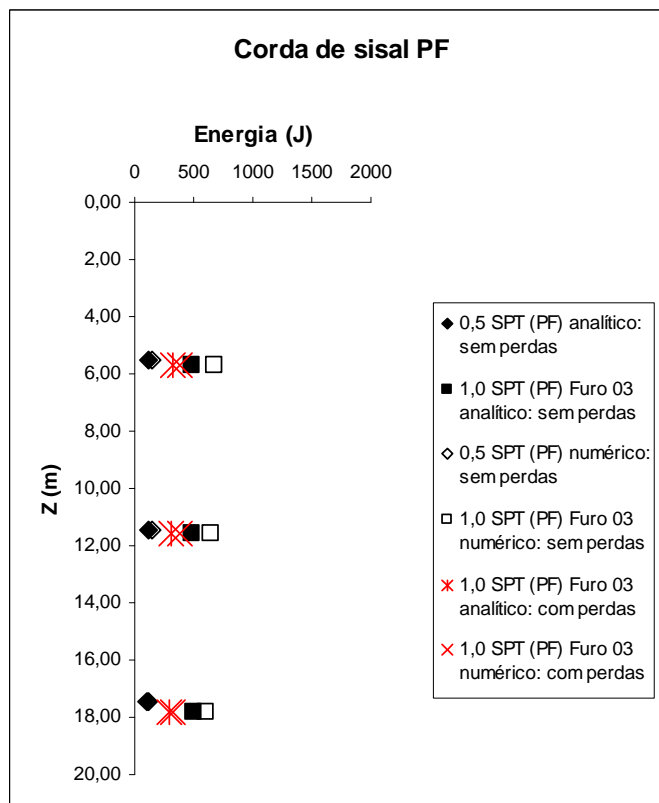
$$** F_d = \frac{E_s}{\Delta\rho}$$

$$*** \sigma_{rup} = \frac{F_d}{A}$$

As Figuras 5.27 a 5.30 ilustram, respectivamente, energia, penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$, força dinâmica F_d e a tensão de ruptura dos ensaios dinâmicos realizados na campanha experimental e suas respectivas simulações numéricas, penetrando em ponta fechada, utilizando o sistema de elevação com o auxílio de cabo de aço e corda de sisal, plotados contra a profundidade Z.

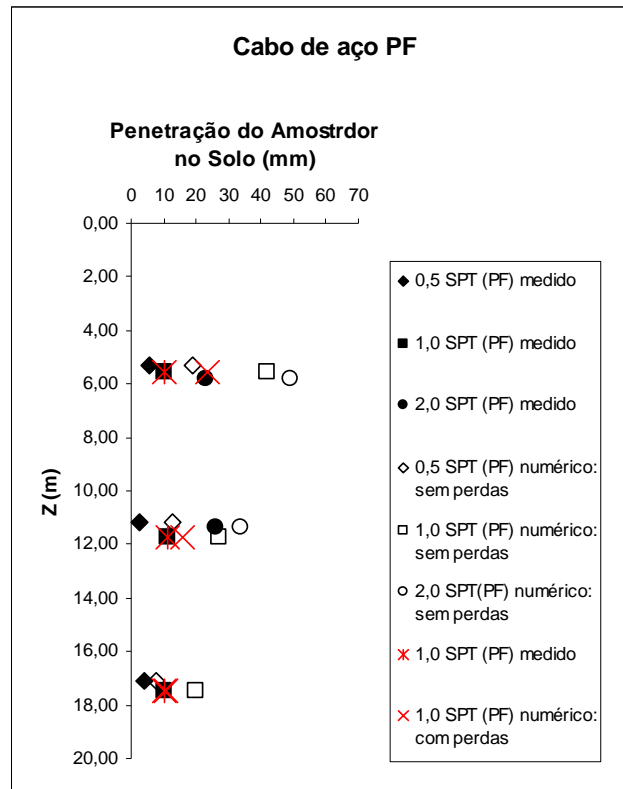


(a) cabo de aço

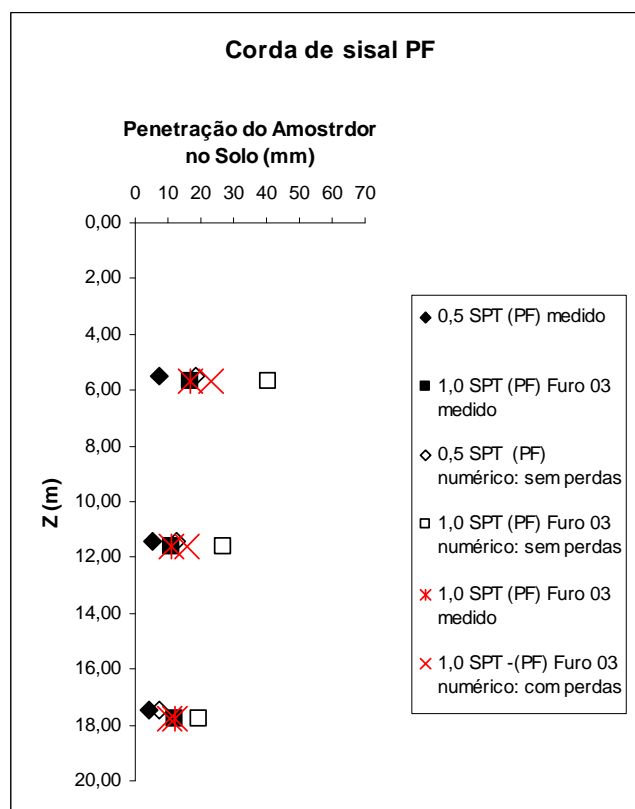


(b) corda de sisal

Figura 5.27: Energia absorvida pelo solo (ensaios penetrando em ponta fechada).

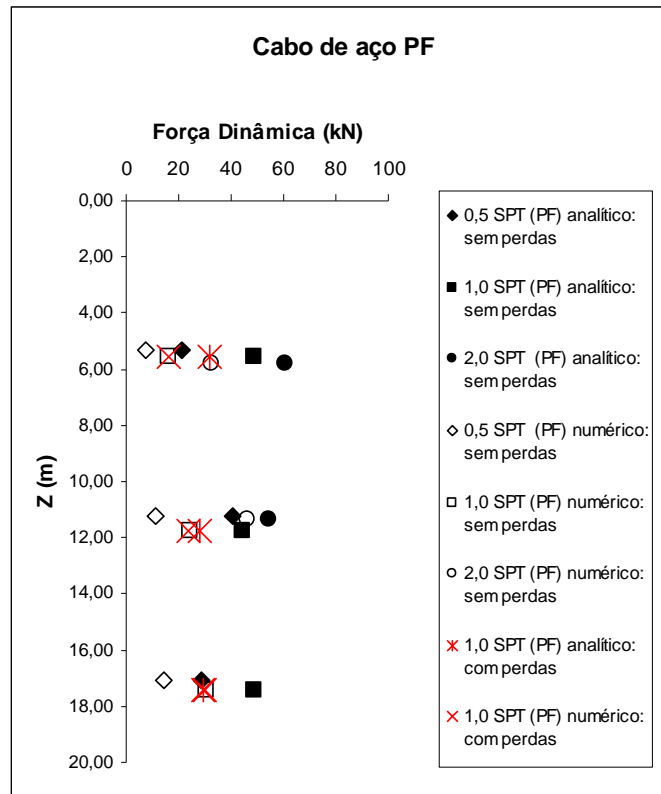


(a) cabo de aço

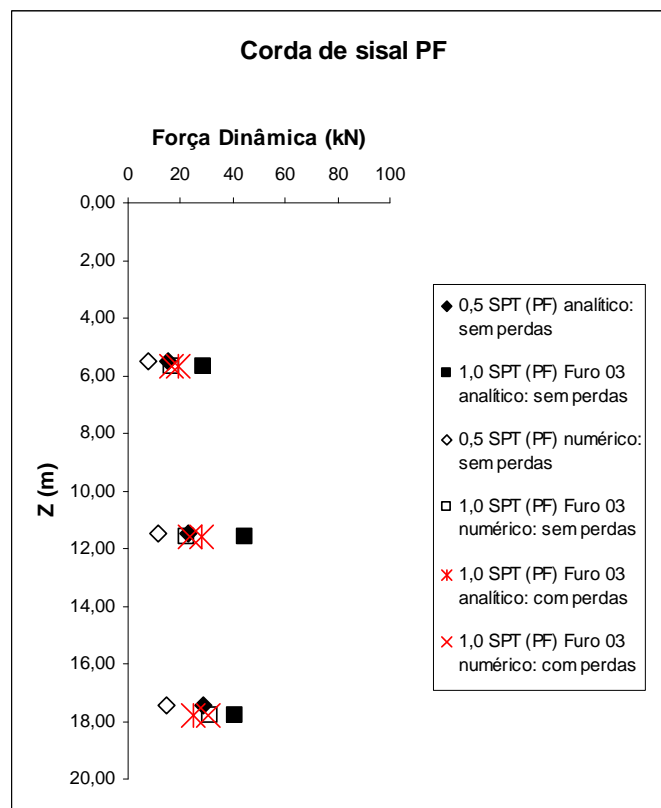


(b) corda de sisal

Figura 5.28: Penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$ (ensaios penetrando em ponta fechada).

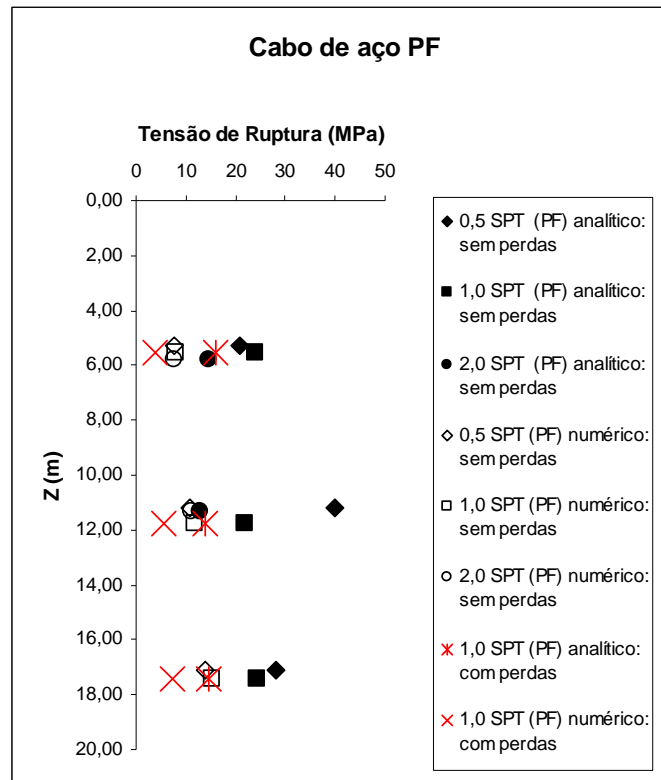


(a) cabo de aço

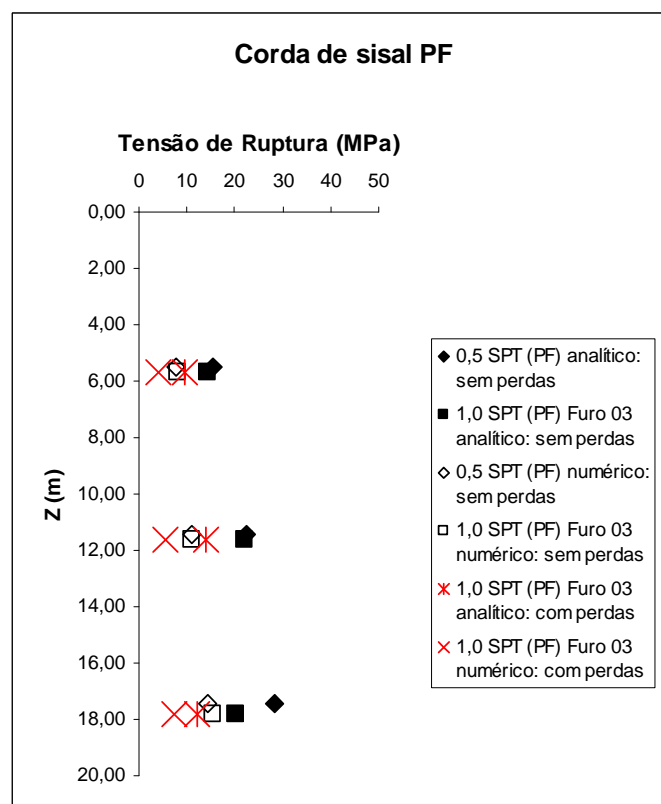


(b) corda de sisal

Figura 5.29: Força dinâmica F_d (ensaios penetrando em ponta fechada).



(a) cabo de aço



(b) corda de sisal

Figura 5.30: Tensão de ruptura (ensaios penetrando em ponta fechada).

Observando as Figura 5.27 percebe-se, da mesma forma que para o ensaio onde a penetração foi realizada de ponta aberta, que a energia mantém-se praticamente constante ao longo da profundidade tanto para o ensaio que utiliza sistema com cabo de aço quanto para o sistema com corda de sisal, porém apresentam diferenças sendo o valor medido experimentalmente menor que o simulado. O valor obtido de energia para o ensaio 0,5 SPT é aproximadamente de 20 % menor que o simulado, para o ensaio 1,0 SPT ela se encontra 25 % menor e no ensaio 2,0 SPT é da ordem de 15 % a menos que o valor simulado, tanto pra o sistema com cabo de aço quanto para o que utiliza corda de sisal. Quando comparando o ensaio 1,0 SPT onde as perdas estão inseridas, percebe-se que o valor de energia tem uma leve redução em relação ao cálculo onde as perdas não estão inseridas, porém continua apresentando valores diferentes entre resultados experimentais e simulados, sendo em torno de 15 % menor que o simulado.

No que diz respeito a penetração do amostrador no solo, a Figura 5.28 apresenta padrões de comportamento semelhantes aos ensaios de penetração com ponta aberta, tanto para o sistema com cabo de aço quanto para o sistema com corda de sisal. A penetração diminuiu com o aumento da profundidade de ensaio, o que já é esperado, porque quanto maior a profundidade, maior o grau de confinamento a que o solo está submetido. O ensaio 0,5 SPT apresenta um valor de penetração 70 % menor que o simulado, para o ensaio 1,0 SPT a redução é de aproximadamente 65 % em relação ao ensaio simulado e no ensaio 2,0 SPT é de 50 %, ocorrendo tanto para os ensaios onde o sistema utiliza corda de sisal quanto para os que utilizam cabo de aço. Analisando os resultados que têm as eficiências inseridas na modelagem (ensaio 1,0 SPT) nota-se uma redução de 50 % em relação aos ensaios simulados utilizando-se cabo de aço e em torno de 30 % para o ensaio que utiliza corda de sisal.

Conforme Figura 5.29, a força dinâmica de reação do solo à cravação do amostrador SPT, aumenta com a configuração do ensaio e, na maioria dos casos, ao longo da profundidade, tanto para o ensaio com sistema utilizando cabo de aço quanto para o que utiliza corda de sisal. Esta observação é concordante com o comportamento verificado nas penetrações em ponta aberta. A força dinâmica tem um incremento em torno de 180 % para o ensaio 0,5 SPT, 150 % para o ensaio 1,0 SPT e 90 % para o ensaio 2,0 SPT, para os ensaios utilizando sistema de elevação com cabo de aço. Quando da utilização da corda de sisal estes valores aumentam em torno de 100% para o ensaio 0,5 SPT e 90 % para o ensaio 1,0 SPT. Quando analisando o ensaio 1,0 SPT com as perdas inseridas, o comportamento é semelhante aos resultados sem as perdas, porém o valor da força dinâmica de reação do solo diminui em relação ao ensaio que não tem em seus resultados as perdas inseridas. Comparando os resultados das simulações

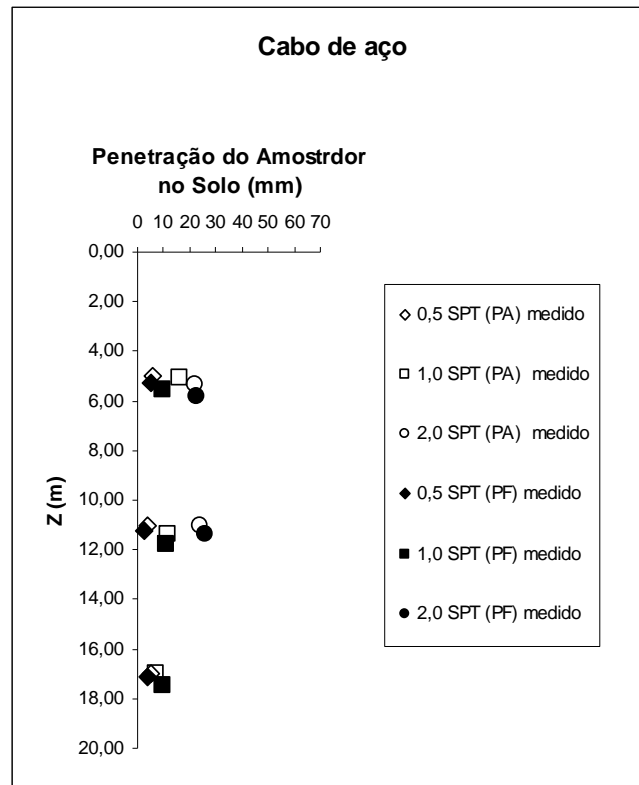
com perdas e resultados de ensaios em campo percebe-se um incremento de 90 % para o sistema com cabo de aço, e em torno de 20 % para o que utiliza corda de sisal.

Avaliando a Figura 5.30 percebe-se que a tensão de ruptura do solo aumenta discretamente ao longo da profundidade de ensaio e, para os ensaios simulados nas mesmas profundidades, apresenta valores praticamente iguais. Analisando os ensaios realizados com sistema com cabo de aço, em termos de simulação e medidas em campo, para as três profundidades analisadas, ocorre um aumento nos valores de tensão da ordem de 180 % para o ensaio 0,5 SPT, 60 % para o ensaio 1,0 SPT e 70 % para o ensaio 2,0 SPT. Quando utiliza-se sistema com corda de sisal, o incremento em relação aos valores simulados são da ordem de 100 % para o ensaio 0,5 SPT, 70 % para o ensaio 1,0 SPT.

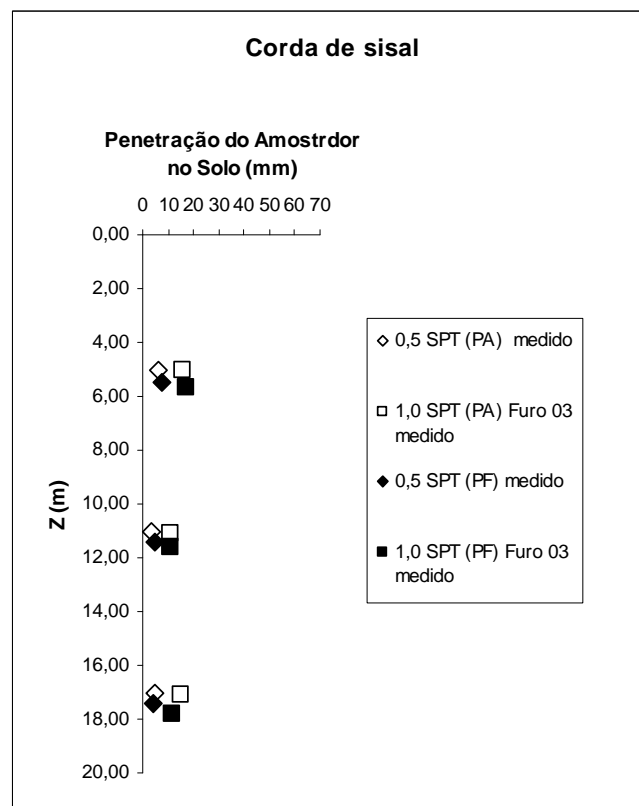
No caso do ensaio 1,0 SPT com as perdas inseridas, nota-se que o comportamento apresentado é similar aos ensaios sem as perdas inseridas, apresentando diferenças entre resultados simulados e resultados experimentais da mesma ordem de grandeza dos valores não corrigidos. O aumento em relação ao ensaio simulado é de 150 % tanto para o sistema com cabo de aço quanto para o que utiliza corda de sisal.

Ainda analisando a Figura 5.30, nota-se que quando comparando tensão de ruptura para cada configuração de ensaio nas mesmas profundidades, estes valores tendem a se aproximar, tornando-se praticamente iguais, principalmente para o sistema que utiliza corda de sisal. Vale destacar que eventuais diferenças se devem a dispersão de resultados inerentes ao ensaio SPT e a heterogeneidade do solo.

Finalmente apresenta-se uma comparação entre as penetrações e a energia produzida nos ensaios de ponta aberta e ponta fechada. Nesta comparação não há necessidade de incluir as perdas e, portanto os resultados são conclusivos. Verifica-se nas Figuras 5.31 e 5.32 que os valores medidos de penetração e os valores de energia calculados analiticamente, apresentam valores similares tanto para os ensaios penetrando em ponta aberta quanto para os ensaios penetrando em ponta fechada, levando a considerar a hipótese de que o amostrador tem seu processo de cravação embuchado.

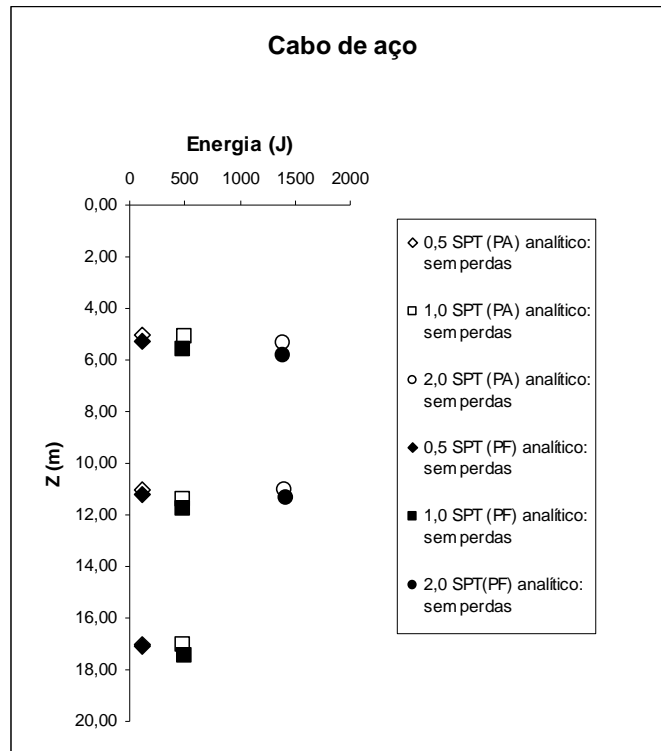


(a) cabo de aço

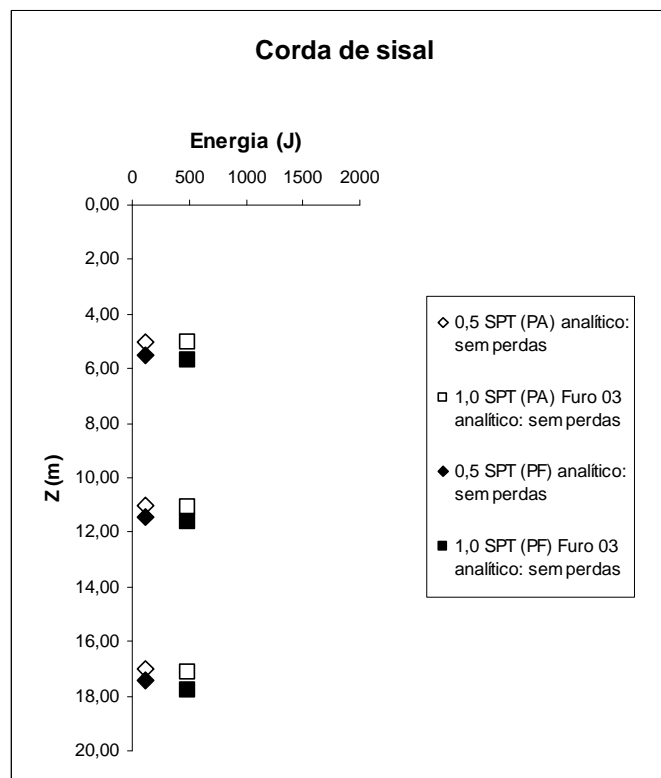


(b) corda de sisal

Figura 5.31: Penetração do amostrador no solo $\Delta\rho$.



(a) cabo de aço



(b) corda de sisal

Figura 5.32: Energia absorvida pelo solo.

Apresenta-se também um comparativo entre as energias produzidas nos ensaios que utilizam o sistema de elevação do martelo com cabo de aço e corda de sisal. Observando a Tabela 5.19 percebe-se que os valores de energia apresentam valores similares, sendo que a relação $E_{sisal}/E_{aço}$ se aproxima de um valor unitário, demonstrando não existir diferença entre os valores de energia nos sistemas utilizados.

Tabela 5.19: Relação entre a energia absorvida pelo solo no sistema de elevação do martelo que utiliza corda de sisal e o sistema que utiliza cabo de aço.

SPT	Profundidade média (m)	E_{sisal} (J)		$E_{aço}$ (J)		$E_{sisal}/E_{aço}$ (J)	
		PA	PF	PA	PF	PA	PF
0,50	5,00	114,590	115,004	114,590	114,412	1,000	1,005
	11,00	114,113	114,618	114,257	113,824	0,999	1,007
	17,00	114,968	114,538	114,968	114,538	1,000	1,000
1,00	5,00	491,482	492,310	490,983	486,203	1,001	1,013
	11,00	489,434	489,434	489,321	488,748	1,000	1,001
	17,00	496,358	492,734	486,038	489,382	1,021	1,007

5.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresentou a campanha de ensaios de campo realizada com o objetivo de verificar experimentalmente as semelhanças geométricas envolvidas no processo de cravação dinâmico, avaliando a penetração do amostrador no solo e sua respectiva tensão de ruptura.

A realização dos ensaios dinâmicos com diferentes dimensões, incluindo o SPT e outros ensaios dinâmicos não padronizados, construídos em escalas distintas, e os componentes do referido ensaio modificados, possibilitaram verificar experimentalmente as semelhanças geométricas envolvidas no processo de cravação dinâmico. No local de estudo, os diferentes equipamentos produzem resistências à penetração do amostrador da mesma ordem de grandeza, independentemente da escala, porém com grande dispersão de resultados. Este fato confirma parcialmente a hipótese inicial, reafirmando que ensaios projetados, respeitando as condições de similaridade, apresentam a mesma tensão de ruptura. Estas conclusões são, entretanto, sujeitas à confirmação futura, devendo-se medir as eficiências em cada configuração de ensaio e repetir a análise proposta.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesta dissertação foram projetados, construídos e testados equipamentos de penetração dentro dos princípios de escala e similaridade. Os equipamentos foram projetados e construídos com base em uma análise dimensional destinada a estabelecer condições de semelhança física entre os protótipos e os modelos utilizados nas experiências, neste caso o ensaio SPT e os ensaios onde seus componentes são modificados com dimensões em diferentes escalas. Uma vez projetados, os equipamentos foram testados em uma campanha experimental e analisados através de uma abordagem numérica.

Através destas análises e com o objetivo de verificar experimentalmente as semelhanças geométricas envolvidas no processo de cravação dinâmico, avaliando a penetração do amostrador no solo e sua respectiva tensão de ruptura, foi realizada uma campanha de ensaios de campo, buscando demonstrar que diferentes equipamentos produzem a mesma resistência do solo à penetração do amostrador, independentemente da escala, sem interveniência de fatores empíricos.

As diversas etapas de trabalho que compõem esta pesquisa produziram informações relevantes, tendo as principais conclusões citadas a seguir.

6.2 CONCLUSÕES

6.2.1 Quanto ao desenvolvimento dos equipamentos

Foram projetados e construídos equipamentos de penetração dentro dos princípios de escala e similaridade, em um grupo de três conjuntos de equipamentos denominados 0,5 SPT, 1,5 SPT e 2,0 SPT. A usinagem dos equipamentos dependeu de material disponível no mercado e também de condições de exequibilidade dos procedimentos in loco e, neste sentido, destacam-se as geometrias que apresentaram ligeiros ajustes em relação às dimensões originalmente escolhidas. A geometria de cada configuração foi determinada a partir da realização de uma análise dimensional.

6.2.2 Quanto à análise numérica

Tendo como objetivo verificar as condições de similaridade entre os ensaios dinâmicos modificados idealizados e executáveis, realizou-se uma análise onde os ensaios dimensionados foram submetidos a uma simulação numérica através de um programa desenvolvido por Lobo *et al* (2007). Esta análise propiciou verificar a inexistência de fatores de escala entre os referidos ensaios. Isto foi comprovado através da equivalência de valores das tensões de ruptura encontrados na simulação dos ensaios idealizados e executáveis, observando que a tensão de ruptura a uma mesma profundidade é semelhante para todas as dimensões de ensaio, demonstrando que o projeto dos equipamentos respeitou os conceitos de similaridade.

6.2.3 Quanto à campanha experimental

Realizada com o objetivo de verificar experimentalmente as semelhanças geométricas envolvidas no processo de cravação dinâmico, na qual foram avaliadas a penetração do amostrador no solo e sua respectiva tensão de ruptura, a campanha de ensaios de campo foi executada em um solo residual predominantemente arenoso localizado na cidade de Joinville, estado de Santa Catarina, nas instalações da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Os ensaios dinâmicos modificados permitiram determinar os valores de $\Delta\rho$ para cada configuração de ensaio e através de $\Delta\rho$ quantificar a energia absorvida pelo solo E_s através da equação proposta por Odebrecht (2003). Com isto foi possível determinar, analiticamente, a força dinâmica e a tensão de ruptura do solo σ_{rup} , através da razão entre a força dinâmica F_d e

a área de ponta do amostrador. A partir destes resultados realizou-se análise dos dados experimentais com base no referencial teórico proposto por Odebrecht (2003) e na abordagem numérica desenvolvida por Lobo *et al* (2007).

Nestas abordagens é necessário conhecer a eficiência de cada configuração testada, como forma de quantificar a energia transferida do martelo para o sistema de cravação e para o solo, durante a penetração do amostrador. No presente trabalho avaliou-se a energia transferida ao amostrador SPT, não tendo sido possível calibrar as outras configurações testadas.

6.2.4 Quanto aos resultados

A realização dos ensaios dinâmicos com diferentes dimensões, incluindo o SPT e outros ensaios dinâmicos não padronizados, construídos em escalas distintas, demonstrou que diferentes equipamentos produzem resistência do solo à penetração similar quando considerados os princípios de escala e similaridade. Porém, observa-se em geral uma dispersão significativa de resultados, efetivamente quando da comparação entre valores medidos e as simulações numéricas, sendo que estas diferenças podem estar relacionadas à heterogeneidade do solo, eficiências e outros fatores inerentes a ensaios de penetração dinâmica.

O fato dos ensaios apresentarem equivalência de valores de tensões de ruptura a uma mesma profundidade reafirma que o projeto dos equipamentos respeita os conceitos de similaridade e apresenta condições de ser utilizado na prática, com vantagens na interpretação dos resultados. Convém destacar a importância de confirmação futura, devendo-se medir as eficiências em cada configuração de ensaio e repetir a análise proposta, proporcionando assim resultados mais consistentes.

6.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O trabalho combinou análises numéricas e experimentais, produzindo evidências quanto à interpretação de ensaios de penetração dinâmica. No entanto, o estudo necessita ser concluído por meio de pesquisas futuras através da calibração da eficiência das diversas configurações de ensaios utilizadas. Recomenda-se, neste sentido:

- Construir células de carga para cada configuração de ensaio, tornando possível

a determinação dos valores de eficiência do martelo, haste e sistema, tornando as comparações mais consistentes.

- Melhorar o mecanismo de retirada das hastes do ensaio 2,0 SPT, através de uma luva com alça para ser colocada na parte superior da haste no momento de sua retirada.
- Tornar os amostradores já existentes bi-partidos, para facilitar a retirada de amostras de solo.
- Realizar um programa experimental com estes equipamentos em um solo arenoso, visando a comparação com estudos que têm sido realizados neste Programa de Pós-Graduação, no que diz respeito a previsão de capacidade de carga de estacas e também para dar continuidade ao programa experimental.

REFERÊNCIAS

- AOKI, N.; CINTRA, J.C.A. **The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT tests.** In: PROCEEDINGS OF THE SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS-WAVE THEORY TO PILES, São Paulo. Anais...p.457-460, 2000.
- AOKI, N.; CINTRA, J.C.A. **Prova de carga estática no amostrador SPT para a obtenção da eficiência e da resistência estática em solo arenoso.** Solos e Rochas, São Paulo: ABMS/ABGE, volume 27, n° 2, p.147-160, maio/agosto, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez.** 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Solo – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT: Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Solo – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Determinação do Limite de Plasticidade.** 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica.** 1984.
- BERINGEN, F. L., VAN HOOYDONK, W. R., and SCHAAP, L. H. J. **Dynamic pile testing: an aid in analysing driving behaviour.** Proceedings, Int. Seminar on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Stockholm, p. 77-97, 1980.
- BOLTON, M. D. **The strength and dilatancy of sands.** Geotechnique, vol. 36, no. 1, p. 65-78, 1986.
- CAVALCANTE, E., H. **Investigação Teórico-Experimental sobre o SPT.** 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- CARNEIRO, F. L. **Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos.** Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 2ª edição, 258 p., 1996.

CARRAPATOSO, C. M. **Projeto de ensaios de penetração dinâmica em diferentes escalas**. 2007. 74 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

DANIEL, C. R. **Split spoon penetration testing in gravels**. M. A. Sc. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, B. C., 2000.

DANIEL, C. R.; HOWIE, J. A.; SY, A. **A method for correlating large penetrometer test (LPT) to standard penetration test (SPT) blow counts**. Canadian Geotechnical Journal, 40: 66-77, 2003.

DE MELLO, V.F.B. (1971) **The standard penetration test**. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 4, Porto Rico. Proceedings, v.1, p.1-87.

FRANÇA, R. T. **Levantamento de Dados e Informações para Mapeamento Geotécnico da Área Urbana de Joinville**. 2002. 107 p. Dissertação de Mestrado. (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

GONÇALVES, C.; ANDREO, C. S.; BERNARDES, G. P.; FORTUNATO, S. G. S. **Controle de Fundações Profundas Através de Métodos Dinâmicos**. São Paulo: editado pelos próprios autores, 253 p., 2000.

KULHAWY, F. H.; CHEN, J. **Evaluation of penetration testes their correlations in gravelly soils**. 16th International Conference on Soil Mechanics Geotechnical Engineering. Osaka, Millpress, p. 707-710, 2005.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**, SI version. New York: John Wiley & Sons Inc., 1979, 553 p.

Langhaar, H. L. **Dimensional analysis and Theory of Models**. New York. John Wiley & Sons, Inc. London, 1951.

LOBO, B. O. **Método de previsão de capacidade de carga de estacas: aplicação dos conceitos de energia do ensaio SPT**. 2005. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGE/UFRGS, Porto Alegre.

LOBO, B. O. **Estudo dos efeitos de escala nos processos de penetração dinâmica em solos**. 2007. 158p. Seminário de Qualificação (Doutorado em Engenharia) – PPGE/UFRGS, Porto Alegre.

LOBO, B.O.; SCHNAID, F. and ROCHA, M. M. **Scale effects on dynamic penetration tests**. In: ISC3 - 3rd International conference on site characterization. 2007. (pre print).

ODEBRECHT, E. **Medidas de energia no ensaio SPT**. 2003. 230 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGE/UFRGS, Porto Alegre.

ODEBRECHT, E; ROCHA, M. M; SCHNAID, F; BERNARDES, G. P. **Transferência de energia no ensaio SPT: Efeito do comprimento de hastes e da magnitude de deslocamentos.** Solos e Rochas, São Paulo: ABMS/ABGE, volume 27, n° 1, p.69-82, jan/abril, 2004.

PEREIRA, R. L.; PIRATH C. E. H.; DA CUNHA, C. J.; PEREIRA D. **Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Material de Infra-Estrutura para Pavimentação e Agregado em Misturas Asfálticas.** In: GEOSUL-2004 IV Simpósio de Prática de Eng. Geotécnica da Região Sul, 2004, Curitiba. Anais do GEOSUL-2004 IV Simpósio de Prática de Eng. Geotécnica da Região Sul, 2004. v. 1. p. 1-9.

ROCHA, M. M. **Ruptura e efeito de escala em materiais não-homogêneos de comportamento frágil.** 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

SCHMERTMANN, J.H.; PALACIOS, A. **Energy dynamics of SPT.** Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.105, n.GT8, 909-926 p.1979.

SCHNAID, F. **Ensaio de Campo e suas aplicações na engenharia de fundações.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 189 p.

SKEMPTON, A. W. **Standard penetration test procedures and effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and over consolidation.** Géotechnique, v.36, n.3, p.425-447, 1986.

SKOV, R. **Evaluation of Stress Wave Measurements,** DMT Gründungstechnik, Hamburg, Germany, 1982.

TIMOSHENKO, S., & GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity,** 3ª edição, McGraw-Hill, 1970.

VÉSIC, A. S. **Expansion of cavities in infinite soil mass.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 98, n° SM 3, 1972.